

HAW-Hamburg - Dep. M&P

Bachelorthesis

Methodische Entwicklung einer Linearachse für Steuerungsaufgaben innerhalb eines Produktionssystems

Name: Schmidt Vorname: Patrick

Matrikelnummer: 1904429

Studiengang: EA vorgelegt am: 01.10.2012

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Jan Holländer Zweitprüfer: Dipl.- Ing. Uwe Aderhold

Zweitexemplar

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	II
Formelverzeichnis	III
Symbole und Kurzzeichen.....	IV
Kurzreferat.....	VI
1 Einleitung	1
2 Theorieteil	2
2.1 Maschinengrundlagen	2
2.2 Konstruktionsmethodik	8
2.3 Berechnungsgrundlagen	13
2.4 Schutzklassen	15
3 Praxisteil.....	18
3.1 Situationsanalyse	18
3.2 Funktionsanalyse	18
3.3 Fehlermöglichkeitseinflussanalyse.....	19
3.4 Marktanalyse	25
3.4.1 Linearachsen.....	25
3.4.2 Pneumatikzylinder.....	28
3.5 Pflichtenheft	29
3.6 Kreativphase	30
3.6.1 Brainstorming	30
3.6.2 Analogiebetrachtung	34
3.6.3 Morphologische Methode.....	37
3.7 Konzeptbewertung.....	38
3.8 Ergebnis.....	41
4 Zusammenfassung	48
Quellenverzeichnis	A

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Füllen.....	2
Abbildung 2 Raffen	3
Abbildung 3 Spreizen	3
Abbildung 4 Verschließen	4
Abbildung 5 DCSV 5000.....	4
Abbildung 6 Baugruppe Spreizvorrichtung.....	5
Abbildung 7 Draufsicht der DCSV 5000.....	6
Abbildung 8 Linearachse MLEKC.....	6
Abbildung 9 Querschnitt der Linearachse MLEKC.....	7
Abbildung 10 Federstahlblech	20
Abbildung 11 Prinzip Skizze der Zahnriemenanordnung	21
Abbildung 12 Kugelumlaufspindel	25
Abbildung 13 Einachsenroboter ISWA/ISPA.....	26
Abbildung 14 Hygienic Aktuator	27
Abbildung 15 Kolbenstangenloser Zylinder.....	28
Abbildung 16 Pneumatikzylinder.....	28
Abbildung 17 Mindmap.....	30
Abbildung 18 Synchrone Pneumatikzylinder mit Hebeln.....	32
Abbildung 19 Elektrisch gesteuerte Linearachse.....	33
Abbildung 20 Umlenkrollen	33
Abbildung 21 Zahnriemenspannplatte.....	35
Abbildung 22 Aufbau mit Zahnriemenspannplatte	35
Abbildung 23 Abstrahiertes Zahnriemenmodell.....	36
Abbildung 24 Darstellung der Scheiben.....	36
Abbildung 25 Cadmodel Hygienic Aktuator	41
Abbildung 26 Schmiermittelkammern	42
Abbildung 27 weitere Ausarbeitung.....	43
Abbildung 28 Magnetische Linearachse	44
Abbildung 29 Querschnittansicht.....	44
Abbildung 30 Baugruppe Spreizvorrichtung.....	47
Abbildung 31 DCSV 5000 ohne Baugruppe Spreizvorrichtung.....	47
Abbildung 32 Eingebaute magnetische Linearachse	47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 FMEA.....	9
Tabelle 2 Lösungsbewertung	11
Tabelle 3 Gewichtungsmaßstab	12
Tabelle 4 Bewertungsmaßstab	12
Tabelle 5 Beispiel.....	13
Tabelle 6 Schutzklassen nach DIN 40 050 Teil 9 und DIN EN 60529.....	15
Tabelle 7 FMEA.....	19
Tabelle 8 Spezifische Zahnkräfte abhängig von der Drehzahl.....	22
Tabelle 9 Spezifische Zahnkräfte abhängig von der Drehzahl.....	24
Tabelle 10 Pflichtenheft	29
Tabelle 11 Morphologischer Kasten	37
Tabelle 12 Bewertungsmatrix Schmierung und Wartung	38
Tabelle 13 Bewertungsmatrix	40
Tabelle 14 FMEA.....	46

Formelverzeichnis

Formel 1 Tangentialkraft.....	7
Formel 2 Drehzahl.....	7
Formel 3 Zähneeingriffszahl.....	7
Formel 4 Zahnriemenbreite.....	7
Formel 5 Übersetzungsverhältnis.....	8
Formel 6 Geschwindigkeit.....	8
Formel 7 Beschleunigung als Funktion der Zeit.....	8
Formel 8 Beschleunigung als Funktion der Strecke.....	8
Formel 9 Drehmoment.....	8

Symbole und Kurzzeichen

a	Beschleunigung	m/s ²
b	Zahnriemenbreite	mm
d	Durchmesser	mm
e	Wellenachsabstand	mm
F_t	Tangentialkraft	N
F_{tspezi}	Spezifische Zahnkraft	N/cm
g	Erdbeschleunigung	m/s ²
h	Potentielle Höhe	m
i	Übersetzungsverhältnis	-
m	Masse	kg
M_2	Abtriebsdrehmoment	Nm
n	Drehzahl	1/min
s	Strecke	m
t	Zeit	s

v	Geschwindigkeit	m/s
z_e	Anzahl der Zähne im Eingriff	-
z_k	Anzahl der vorhandenen Zähne	-
μ	Reibungsbeiwert	-
π	Konstante	-

Kurzreferat

Diese Bachelorthesis hat ihren Schwerpunkt in der Anwendung des methodischen Konstruierens. Zusätzlich sind konstruktive Berechnungen, Maschinenelemente und CAD implementiert. Grundlage der Arbeit sind Funktionsprobleme mit einer Baugruppe, die Bestandteil einer Produktionsmaschine ist. In der Einleitung wird die Problematik der Baugruppe dargestellt und die abgeleitete Aufgabenstellung mit der Zielsetzung beschrieben. Im zweiten Kapitel werden die theoretischen Grundlagen der Produktionsmaschine, des methodischen Konstruierens, Berechnungsgrundlagen aus der Zahnriementechnik und die Schutzklassen erklärt. Im Praxisteil erfolgen gemäß der Konstruktionsmethodik die Situations-, Funktions-, Fehlermöglichkeitseinfluss- und Marktanalyse, die Erstellung des Pflichtenhefts, die Kreativphase und die Konzeptbildung mit anschließender Bewertung. Auf Basis der Konzeptbewertung wird das Ergebnis dargestellt. In Kapitel 4 ist eine Zusammenfassung ausgearbeitet. Diese beinhaltet eine kritische Bewertung und eine Diskussion über verbleibende Aufgaben zur Weiterentwicklung der Konstruktion.

1 Einleitung

Die Tipper Tie technopack GmbH vertreibt Verpackungsmaschinen für die Lebensmittelindustrie. Die DCSV 5000 ist ein Doppelclipautomat zum Verschließen von Därmen und Hüllen, die mit Lebensmitteln, wie Brät, Fleisch oder Käse gefüllt werden. Dies erfolgt in vier Arbeitsschritten. Der erste Arbeitsschritt ist das Füllen des Darms. Danach erfolgen das Raffen und das Spreizen. Das Spreizen ist eine lineare Bewegung, die von der Linearachse MLEKC ausgeführt wird. Dieser Arbeitsschritt ist notwendig, um dem Clipwerkzeug das Verschließen des Darms zu ermöglichen. Die Linearachse MLEKC ist folglich wesentlicher Bestandteil der Produktionsmaschine DCSV 5000. Während der Produktion treten Probleme mit der Linearachse MLEKC auf. Das Federstahlblech ist nach einiger Zeit defekt, wodurch keine Dichtwirkung mehr gewährleistet werden kann. Zusätzlich kommt es zu einer Längenänderung des Zahnriemens, wodurch das Spreizen nicht mehr ausgeführt werden kann. Des Weiteren gibt es Fälle, bei denen die Kugelschienenführung beschädigt wurde. In allen Schadensfällen kommt es zum kompletten Ausfall der Maschine DCSV 5000. Um wieder eine Produktionszuverlässigkeit der Maschine DCSV 5000 zu erreichen, müssen diese Probleme dauerhaft behoben werden. Dazu werden mit einem Brainstorming, einer Analogiebetrachtung und der morphologischen Methode alternative Konzepte zur Linearachse MLEKC entwickelt. Diese Konzepte werden anhand ihrer technischen Wertigkeit verglichen. Als Ergebnis der Aufgabe wird ein Konzept, das die höchste technische Wertigkeit hat, ausgearbeitet. Diese zeigt dreidimensionale Konstruktionen, mit deren Hilfe das Ergebnis tiefgreifend erklärt und diskutiert wird.

2 Theorieteil

In der Theorie werden die Maschinengrundlagen und ein Abriss aus der Konstruktionsmethodik erläutert. Zusätzlich sind hier die Berechnungsgrundlagen zur Zahnriemensauslegung und die Schutzklassen erklärt.

2.1 Maschinengrundlagen

Zu Beginn werden die vier wesentlichen Arbeitsschritte erklärt. In Abbildung 1 ist das Füllen des Darms dargestellt. Die Produktion verläuft von rechts nach links. Der Darm wird außen auf ein Rohr gezogen. Das Brät wird durch das Innere des Rohres gefördert, wodurch der Darm gefüllt und durch die Rafferpaare gedrückt wird. In Abbildung 2 ist das Raffen des Darms dargestellt. Zu erkennen ist die Schließbewegung der beiden Rafferpaare. Nach dem Raffen erfolgt das Spreizen (Abbildung 3). Das Spreizen verdrängt das Brät in dem Darm und ermöglicht dem Clipwerkzeug, den Darm zu verschließen (Abbildung 4).

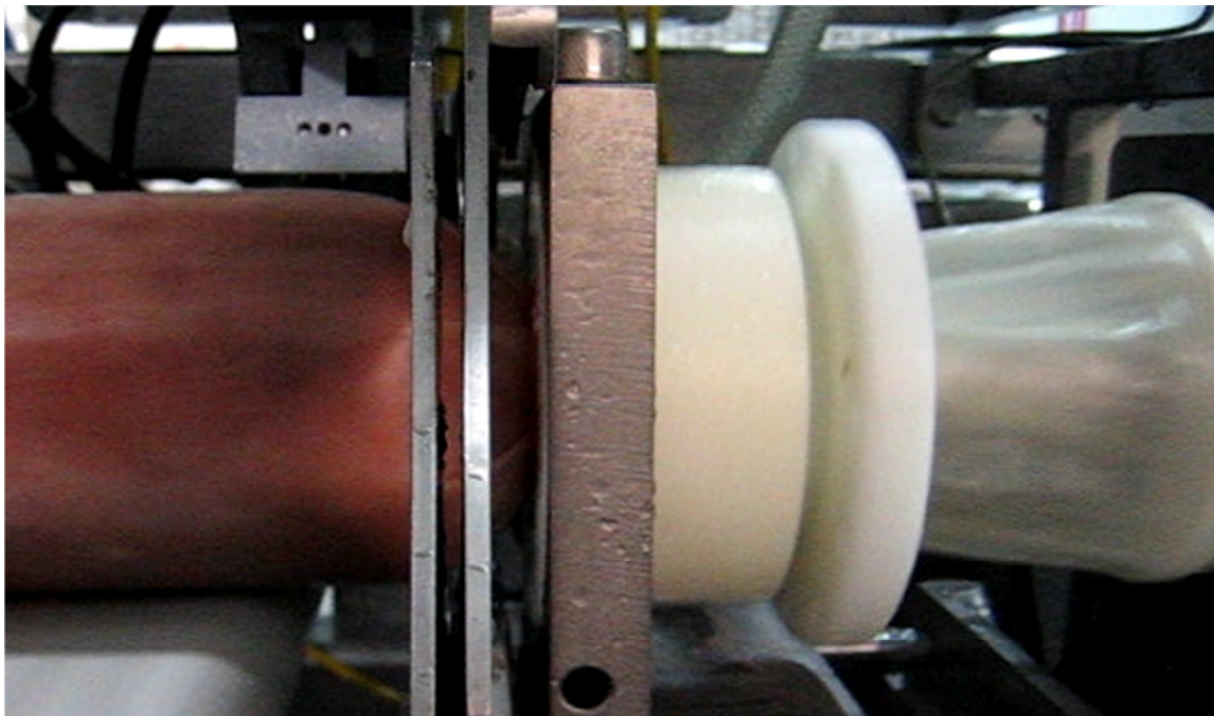


Abbildung 1 Füllen¹

¹ zur freien Verfügung von der Tipper Tie technopack GmbH

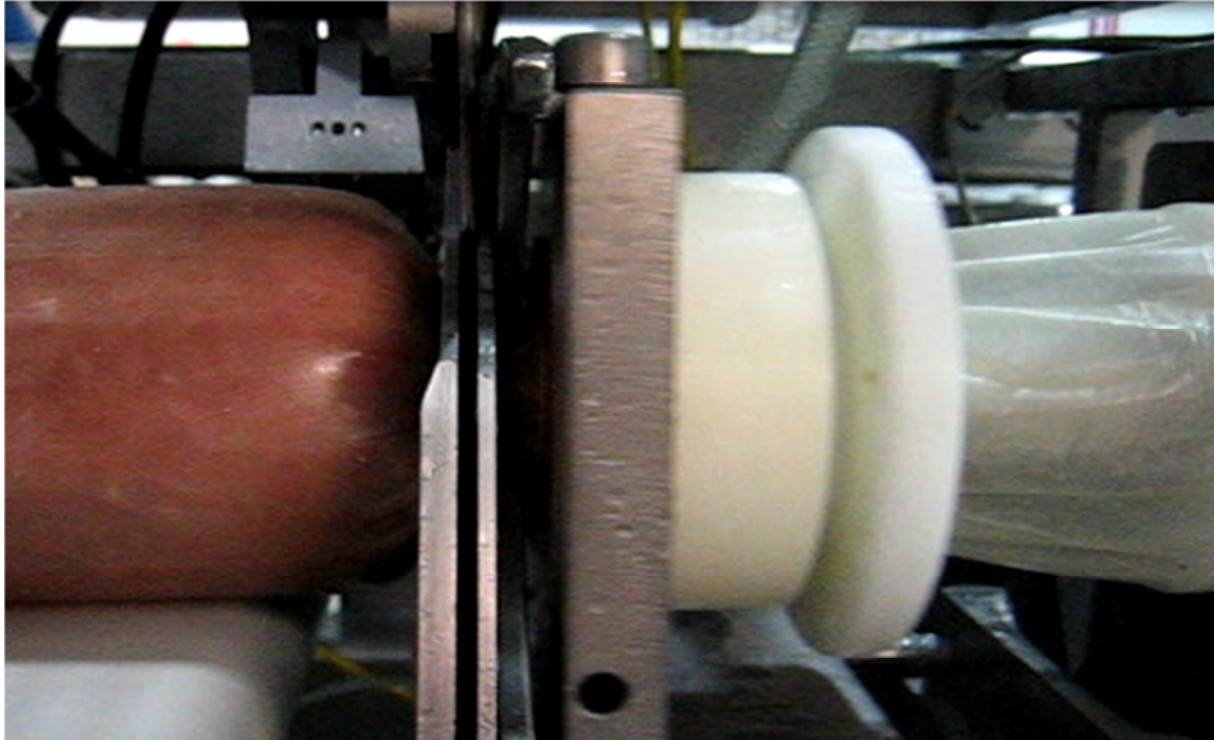


Abbildung 2 Raffenzug²

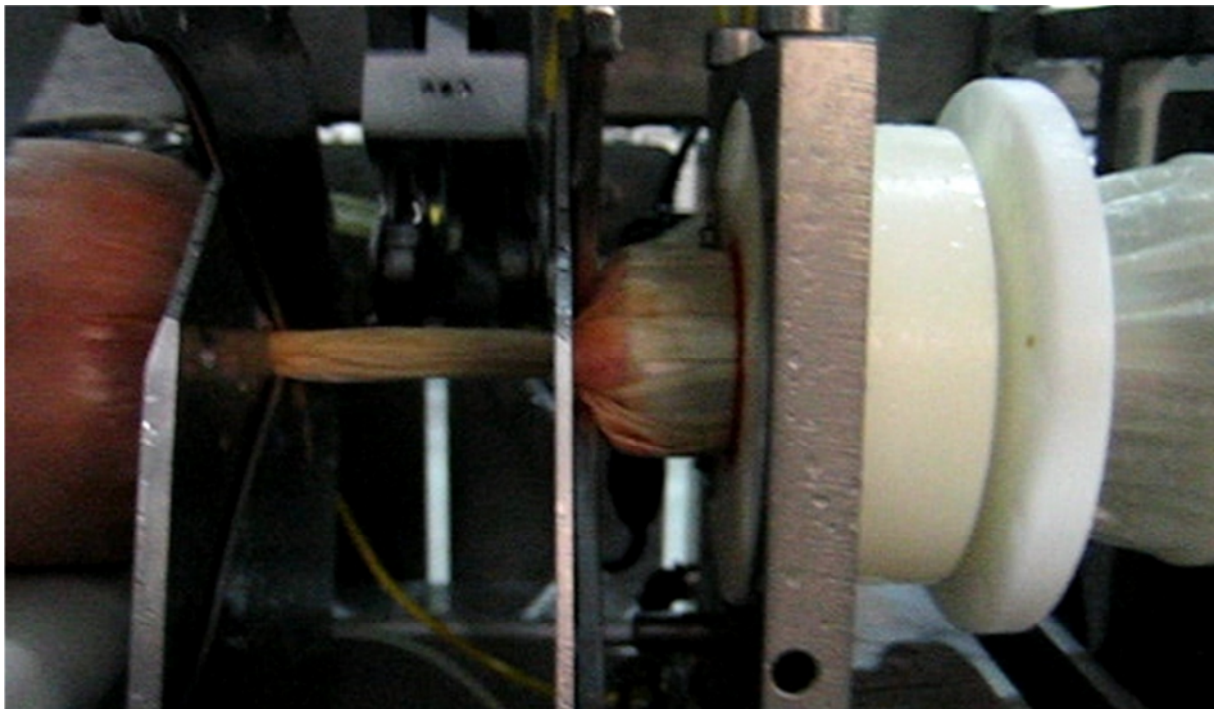


Abbildung 3 Spreizen³

² zur freien Verfügung von der Tipper Tie technopack GmbH

³ zur freien Verfügung von der Tipper Tie technopack GmbH

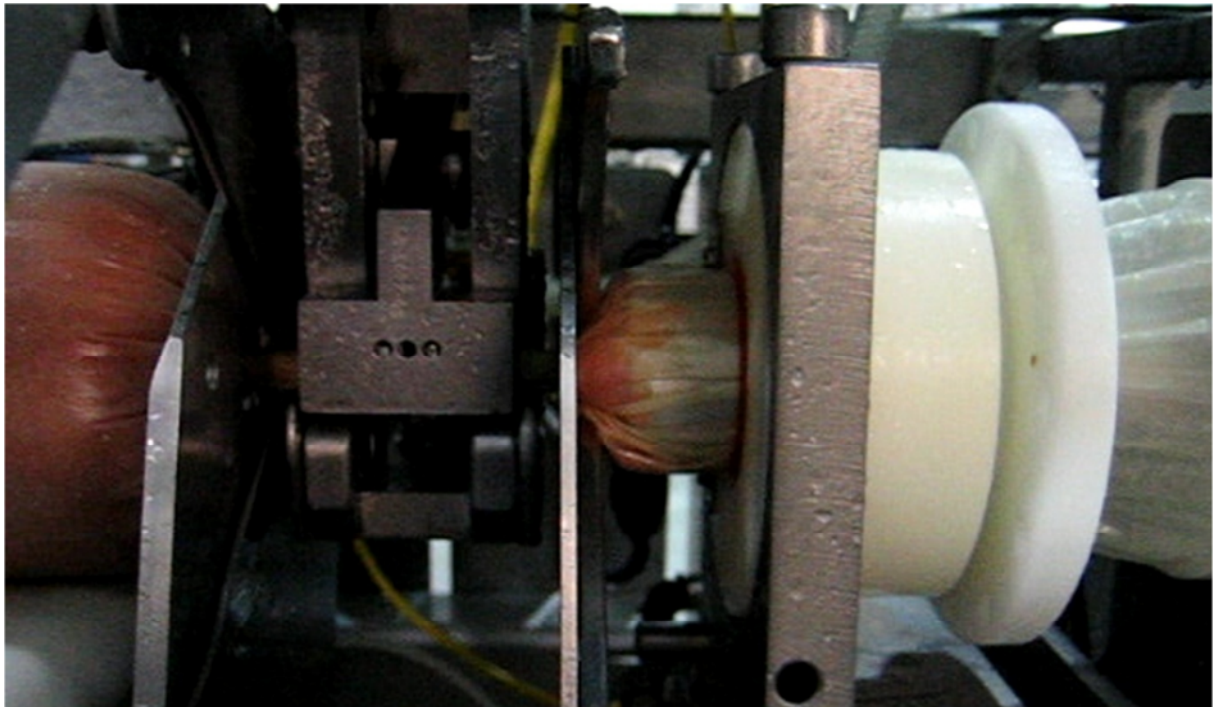


Abbildung 4 Verschließen⁴

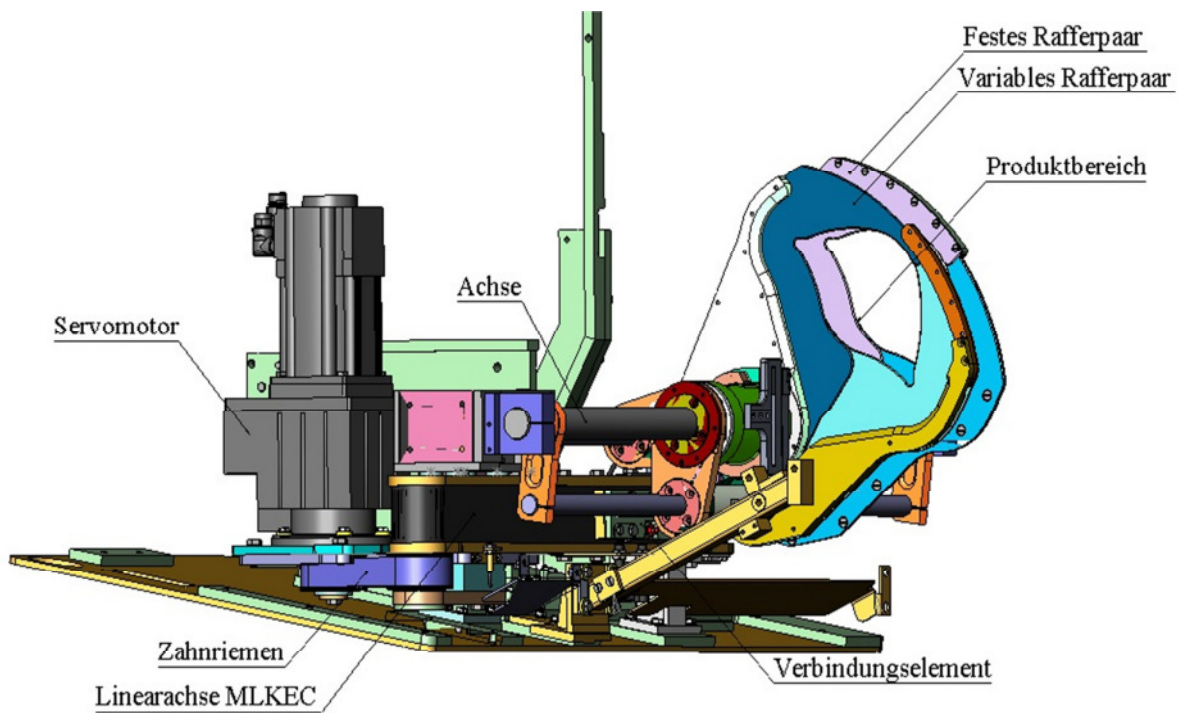


Abbildung 5 DCSV 5000⁵

⁴ zur freien Verfügung von der Tipper Tie technopack GmbH

⁵ zur freien Verfügung von der Tipper Tie technopack GmbH

In Abbildung 5 ist die Maschine DCSV 5000 reduziert auf die an der Produktion beteiligten Elemente dargestellt. Das Spreizen wird von dem Servomotor initiiert und über einen Zahnriemen auf die Linearachse MLEKC übertragen (Abbildung 5). Durch das Verbindungselement und die Gabel in Abbildung 6 wird die Bewegung auf das variable Rafferpaar übertragen. Je nach Anforderung bzw. Größe des Produktes kann die zurückzulegende Strecke variieren. Beim Spreizen werden 68mm zurückgelegt. Das lockere Füllen entspricht dem Spreizen, bei dem eine größere Strecke zurückgelegt wird ($68\text{mm} + X\text{mm}$ für $0\text{mm} > X < 320\text{mm}$). Dadurch wird eine gesamte Strecke von ca. 400mm benötigt, die die Linearachse MLEKC zurücklegen muss. Die Hülse (Abbildung 7) ist gleitend und drehbar auf der Achse gelagert. Das ist notwendig, weil die Hülse bei der Schließbewegung des variablen Rafferpaars eine drehende Bewegung durchführt. Folglich ist die Hülse auch nicht fest mit der Gabel verbunden. Die Linearachse MLEKC (Abbildung 8) besteht aus einer Kugelschienenführung, zwei Wangen, einem endlosen Zahnriemen, dem Verbindungselement und einem Federstahlblech. Der Zahnriemen ist mit dem Verbindungselement und dem Gleitstück der Kugelschienenführung, die von der Innenseite an den Wangen mit den Montageschrauben befestigt ist, verschraubt. Dadurch wird die Bewegung des Zahnriemens auf das Verbindungselement übertragen und dieses durch die Kugelschienenführung geführt.

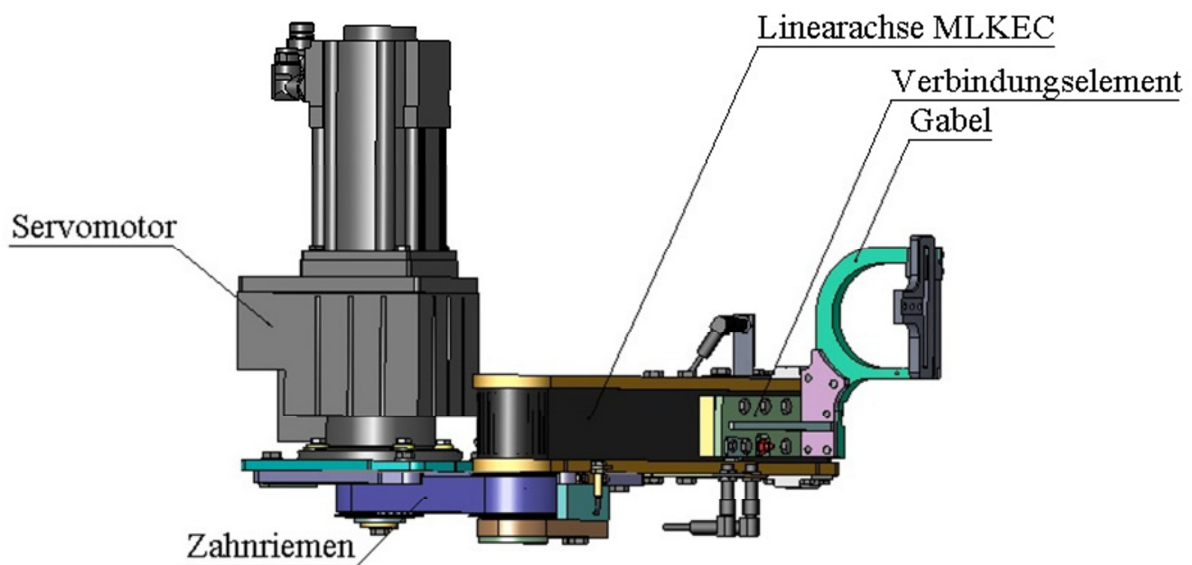


Abbildung 6 Baugruppe Spreizvorrichtung⁶

⁶ zur freien Verfügung von der Tipper Tie technopack GmbH

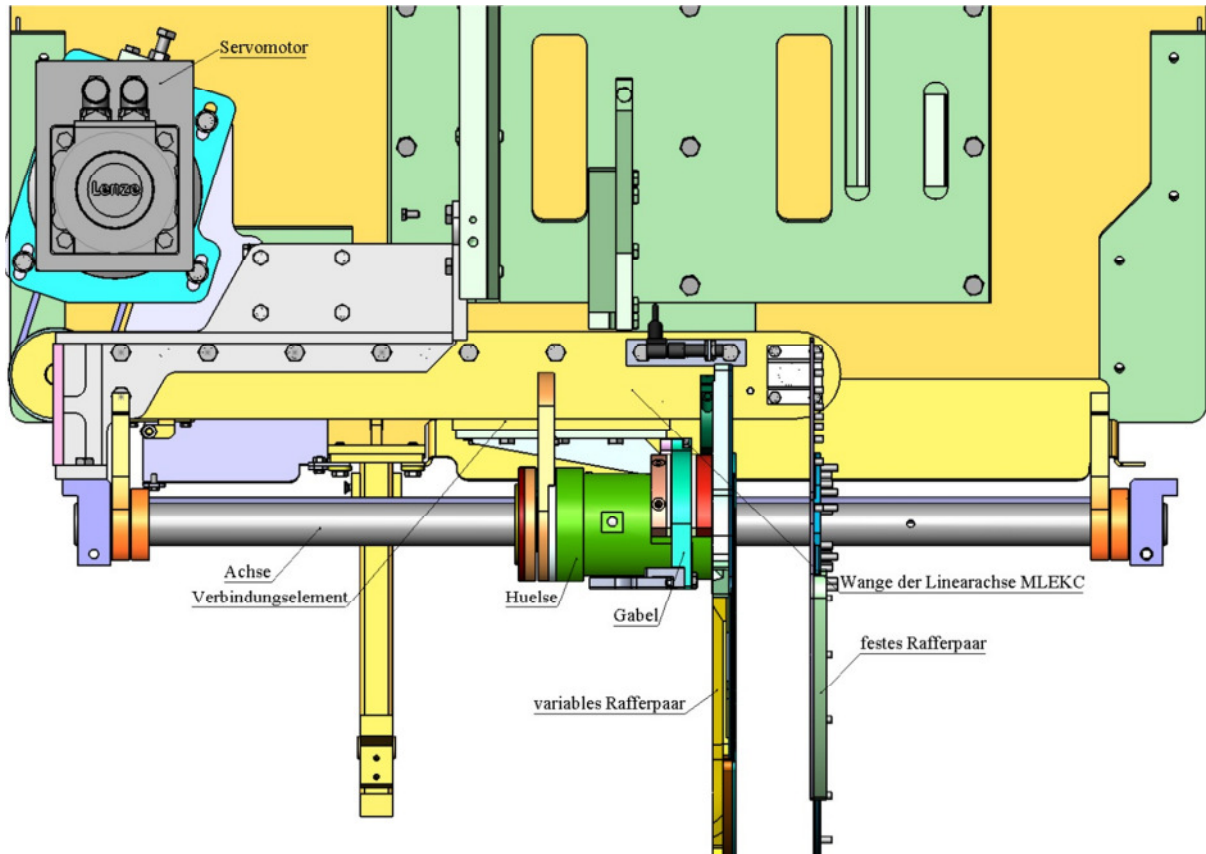


Abbildung 7 Draufsicht der DCSV 5000⁷

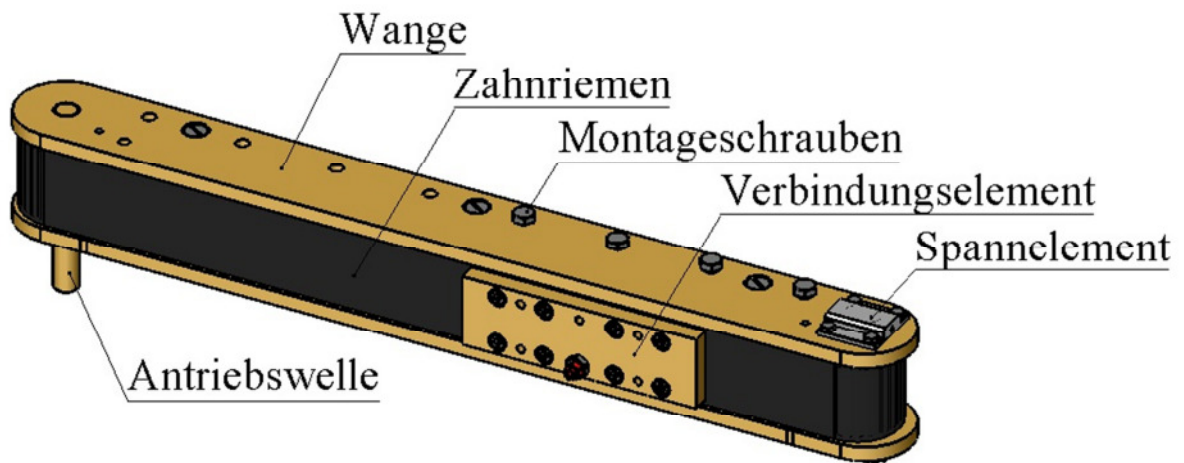


Abbildung 8 Linearachse MLEKC⁸

⁷ zur freien Verfügung von der Tipper Tie technopack GmbH

⁸ zur freien Verfügung von der Tipper Tie technopack GmbH

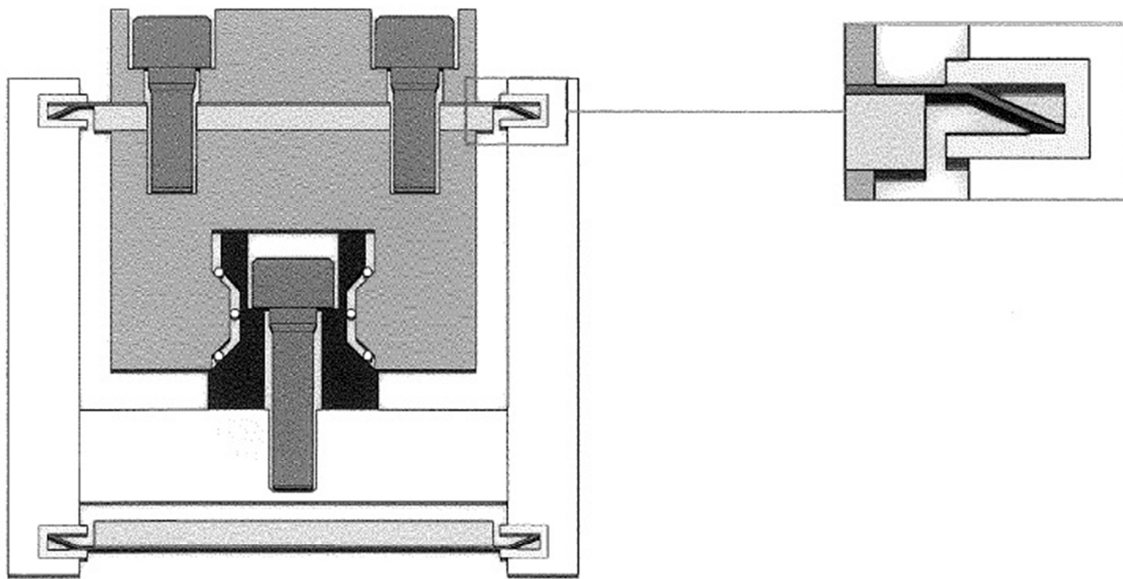


Abbildung 9 Querschnitt der Linearachse MLEKC⁹

In dem Auszug in Abbildung 9 ist das Federstahlblech und das patentierte Dichtungssystem der Strasser GmbH dargestellt. Die Dichtung funktioniert durch ein umlaufendes Federstahlblech, das in einem Dichtungsprofil aus Polyoxymethylen (POM) läuft. Dadurch wird zum einen verhindert, dass Fremdkörper wie Staub oder auch Strahlwasser an die Kugelschienenführung im Inneren gelangen können. Zum anderen verhindert diese Dichtung auch den Austritt von Betriebsmitteln. Dadurch eignet sich die Linearachse besonders für den Einsatz in Lebensmittelmaschinen.

Technische Daten der Linearachse MLEKC¹⁰

- Geschwindigkeit max. 5m/s
- Beschleunigung max. 50m/s²
- Umgebungstemperatur -10°C bis +60°C
- Zahnriementyp 60AT10
- Schutzklasse IP 65 nach DIN 40 050 Teil 9 und DIN EN 60529

⁹ <http://www.strasser-gmbh.com/katalog/cleanmotion-broschuere>

¹⁰ <http://www.strasser-gmbh.com/katalog/cleanmotion-broschuere>

2.2 Konstruktionsmethodik¹¹

Unternehmen wollen am Markt konkurrenzfähig bleiben. Deshalb ist für Unternehmen wichtig, vorhandene Produkte stetig weiter zu verbessern oder neue zu entwickeln. Weiter- und Neuentwicklungen sind allerdings nur möglich, wenn strukturiert und methodisch vorgegangen wird. Deshalb verwendet man die Konstruktionsmethodik. Der methodische Konstruktionsprozess beginnt mit einer Problemstellung, anhand derer die Konstruktionsaufgabe bzw. der Entwicklungsauftrag definiert wird. Anschließend wird eine Informationssammlung durchgeführt, die eine Situations-, Funktions-, Fehlermöglichkeitseinfluss- und Marktanalyse beinhaltet. Bei einer Weiterentwicklung wird mit der Situationsanalyse der aktuelle technische Stand der Maschine, Baugruppe oder des Bauteils festgehalten. In der Funktionsanalyse werden die einzelnen Funktionen einer Maschine oder Baugruppe aufgelistet. Diese wird für die Fehlermöglichkeitseinflussanalyse (FMEA) und den morphologischen Kasten benötigt. Die FMEA ist eine Methode, die sich mit der Erkennung und Behandlung von potentiellen Fehlern beschäftigt. Im Rahmen des Qualitätsmanagements wird die FMEA verwendet, um das entstehende Risiko durch das Auftreten von Fehlern zu minimieren.¹² Dazu werden die Funktionen der Baugruppe oder Maschine auf potentielle Schwachstellen analysiert. Die FMEA wird mittels Tabelle 1 durchgeführt. In der ersten Spalte werden die Funktionen aus der Funktionsanalyse übernommen. Zu den einzelnen Funktionen werden die möglichen Fehler aufgelistet und in Beschreibung, Folgen und Ursache zerlegt. In der zweiten Spalte wird der derzeitige Zustand und in der dritten der verbesserte Zustand bewertet. Dies erfolgt nach Auftrittswahrscheinlichkeit, Bedeutung und Entdeckungswahrscheinlichkeit durch die Vergabe von Punkten nach folgender Auflistung¹³.

Auftrittswahrscheinlichkeit (A)

- unwahrscheinlich = 1
- sehr gering = 2-3
- gering = 4-6
- mäßig = 7-8
- hoch = 9-10

¹¹Conrad, Peter : Schiemann, Hubert : G.Vömel, Paul : Erfolg durch methodisches Konstruieren . 1. Grafenau/Württ. : Lexika-Verlag : 1977

¹² <http://home.intergga.ch/neo/downloads/fmea.pdf>

¹³ <http://www.meistersite.de/pdfs/methodenkoffer/FMEA.pdf>

Bedeutung (B)

- kaum wahrnehmbare Auswirkungen = 1
- geringe Belästigung des Kunden = 2-3
- mäßig schwerer Fehler = 4-6
- schwerer Fehler, Kundenverärgerung = 7-8
- äußerst schwerwiegender Fehler = 9-10

Entdeckung (C)

- hoch = 1
- mäßig = 2-3
- gering = 4-6
- sehr gering = 7-8
- unwahrscheinlich = 9-10

Tabelle 1 FMEA¹⁴

Stammdaten							Stammdaten					
Funktionen	mögliche Fehler			derzeitiger Zustand			verbesserter Zustand					
	Fehlerbeschreibung	Fehlerfolgen	Ursache	Wahrscheinlichkeit [A]	Bedeutung [B]	Entdecken [C]	RPZ = A x B x C	Korrektur	Wahrscheinlichkeit [A]	Bedeutung [B]	Entdecken [C]	RPZ = A x B x C

Die Risikoprioritätszahl (RPZ) des derzeitigen Zustands wird danach mit der Risikoprioritätszahl des verbesserten Zustands verglichen.¹⁵ Zusätzlich wird noch eine Marktanalyse durchgeführt. Dazu werden geeignete Maschinen, Baugruppen oder Bauteile, die am Markt angeboten werden und für die

¹⁴ <http://www.meistersite.de/pdfs/methodenkoffer/FMEA.pdf>

¹⁵ <http://home.intergga.ch/neo/downloads/fmea.pdf>

Lösung des eigenen Problems in Frage kommen, festgehalten. Auf Basis der Informationssammlung wird dann ein Pflichtenheft erstellt. Es enthält alle Kriterien, die für die Funktion der Maschine oder der Baugruppe nötig sind. Die Kriterien werden nach Wünschen, Forderungen und Unklarheiten klassifiziert. Das Pflichtenheft ist wesentlicher Bestandteil der Entwicklungsphase. Das weitere Vorgehen baut auf diesem Dokument auf. In der Kreativphase werden mit Problemlösungsmethoden Konzepte entwickelt. Die Problemlösungsmethoden sind zum einen die intuitive Methode und zum anderen die diskursive Methode. Zu der intuitiven Methode zählt unter anderen das Brainstorming. Bei einem Brainstorming wird alles notiert, was einer Gruppe aus Fachleuten zur Lösung des Problems einfällt. Diese Lösungen basieren folglich auf einem Zufallsprinzip. Während eines Brainstormings entstehen viele verschiedene Konzepte. Dabei ist zunächst egal, ob das Konzept geeignet ist oder nicht. Es geht darum, Ideen zu sammeln, die später auf ihre Verwendbarkeit geprüft werden. Bei der diskursiven Methode kann unter anderem eine Analogiebetrachtung sowie die morphologische Methode verwendet werden. Bei einer Analogiebetrachtung wird untersucht, ob vorhandene Lösungen durch konstruktive Änderungen als Lösung für das eigene Problem in Frage kommen. Die morphologische Methode ist eine Tabelle, in der die erarbeiteten Funktionen aus der Funktionsanalyse zeilenweise aufgelistet sind. Nun trägt man spaltenweise für jede Funktion mögliche Lösungen ein, die die gewünschte Funktion umsetzen. Durch kombinieren der einzelnen Lösungen erhält man schließlich viele verschiedene Gesamtkonzepte. Diese Konzepte werden im nächsten Arbeitsschritt diskutiert, um eine erste Abschätzung über die Eignung der Lösung zu erhalten. Der Vorteil der morphologischen Methode ist, dass durch das systematische Vorgehen oft Lösungen gefunden werden, die durch intuitive Methoden, wie dem Brainstorming, nicht erkannt werden.¹⁶ Abgeschlossen wird dieser Arbeitsschritt mit einer Bewertung der Konzepte. Diese Bewertung erfolgt durch Ermittlung der technischen Wertigkeit. Dazu werden die Bewertungskriterien in die Zeilen und die erarbeiteten Konzepte in die Spalten geschrieben (siehe Tabelle 2).

¹⁶ Conrad, Peter : Schiemann, Hubert : G.Vömel, Paul : Erfolg durch methodisches Konstruieren . 1. Grafenau/Württ. : Lexika-Verlag : 1977

Tabelle 2 Lösungsbewertung

Bewertungskriterien	Gewichtung	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 4	...
Bewertungs-kriterium 1	4					
Bewertungs-kriterium 2	3					
Bewertungs-kriterium 3	1					
...	...					

Nun bekommen die Bewertungskriterien eine Gewichtung nach Tabelle 3. Die Bewertung erfolgt durch Vergabe von Punkten nach Tabelle 4. Die Gesamtpunktzahl für ein Bewertungskriterium berechnet sich aus der Multiplikation von Gewichtung und Bewertung. Die technische Wertigkeit berechnet sich nach der Division aus der Summe der erreichten Punktzahl durch maximal erreichbare Punktezahl. Ein Beispiel zeigt Tabelle 5. Zum Beispiel bekommt das erste Konzept beim ersten Bewertungskriterium vier von vier möglichen Punkten. Mit einer Gewichtung von vier werden das folglich 16 Punkte. Beim zweiten Kriterium bekommt das erste Konzept nur zwei von vier Punkten. Folglich werden sechs Punkte aufgeschrieben. Maximal können 32 Punkte in diesem Beispiel erreicht werden. Das erste Konzept erreicht hier nur 24 Punkte. Somit ergibt sich für die technische Wertigkeit $24/32 = 0,75$. Anhand der technischen Wertigkeit wird das weiter zu entwickelnde Konzept ausgewählt. Die FMEA kann dann vervollständigt und erste Konstruktionen erstellt werden. Im vorletzten Arbeitsschritt sind maßstäbliche Entwürfe, Überschlagsrechnungen und eine technisch-wirtschaftliche Bewertung auszuführen. Ergebnis dieses Arbeitsschrittes sind technische Unterlagen, die zur Fertigung freigegeben werden können. Der letzte Arbeitsschritt beinhaltet prüfende Maßnahmen von Herstellkosten bis zum Prototypen. Ergebnis dieses Arbeitsschrittes ist die Fertigungsfreigabe.

Tabelle 3 Gewichtungsmaßstab¹⁷

Sehr wichtig	4
Wichtig	3
Weniger wichtig	2
Geringer Einfluss	1
Unwichtig	0

Tabelle 4 Bewertungsmaßstab¹⁸

Sehr gut	4
Gut	3
Ausreichend	2
Gerade noch tragbar	1
Unbefriedigend	0

¹⁷ Conrad, Peter : Schiemann, Hubert : G.Vömel, Paul : Erfolg durch methodisches Konstruieren . 1. Grafenau/Württ. : Lexika-Verlag : 1977

¹⁸ Conrad, Peter : Schiemann, Hubert : G.Vömel, Paul : Erfolg durch methodisches Konstruieren . 1. Grafenau/Württ. : Lexika-Verlag : 1977

Tabelle 5 Beispiel

Bewertungskriterien	Gewichtung	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Konzept 4	...
Bewertungs-kriterium 1	4	16				
Bewertungs-kriterium 2	3	6				
Bewertungs-kriterium 3	1	2				
...				
technische Wertigkeit mit Gewichtung	-	0,75

2.3 Berechnungsgrundlagen¹⁹

In der Zahnriementechnik wird die Tangentialkraft über die Zahnscheibe auf den Zahnriemen übertragen. Die Formel besteht aus drei Termen. Der erste Term erfasst die horizontale Beschleunigung. Der zweite Term die potentielle Kraft, die in diesem Fall vernachlässigt wird, weil es sich um eine horizontale Bewegung handelt. Der letzte Term erfasst die Widerstandskraft. Die Formel beschreibt sich wie folgt:

$$F_t = m * a + m * g * h + m * g * \mu \quad (1)$$

¹⁹ Muhs, Dieter : Wittel, Herbert : Jannasch, Dieter : Voßiek, Joachim : Roloff/Matek Maschinenelemente . 18. Wiesbaden : Vieweg Verlag : 2007

Die Drehzahl der Zahnscheibe ist abhängig von der Geschwindigkeit des Zahnriemens. Die Geschwindigkeit wirkt tangential an der Zahnscheibe. Die zurückgelegte Strecke je Umdrehung der Zahnscheibe entspricht dem Umfang der Zahnscheibe. Somit berechnet sich die Drehzahl wie folgt:

$$n = \frac{v}{d * \pi} \quad (2)$$

Ein weiterer Wert, der zur Auslegung eines Zahnriemens benötigt wird, ist die Anzahl der Zähne im Eingriff. Zur Berechnung dieses Wertes wird der Umschließungswinkel β eingeführt. Dies ist der Winkel, mit dem der Zahnriemen die Zahnscheibe umschließt. Zum Beispiel beträgt der Umschließungswinkel bei einer 1:1 Übersetzung bzw. gleichem Last- und Leertrum des Zahnriemens 180° . Nun wird der Umschließungswinkel ins Verhältnis mit den auf dem Umfang verteilten Zähnen gesetzt und die Zähneeingriffszahl wie folgt berechnet:

$$z_e = \frac{z_k * \beta}{360^\circ} \quad (3)$$

Zur Bestimmung der Zahnriemenbreite ist es nun notwendig, Materialkennwerte des Zahnriemens in die Berechnung einfließen zu lassen. Dazu gibt der Hersteller die sogenannte spezifische Zahnkraft an. Diese wird mittels der Drehzahl aus Tabellen entnommen. Sie sagt aus, wie viel Newton pro Zentimeter Riemenbreite an einem Zahn zugelassen sind. Deshalb wird dieser Wert noch mit der Zähneeingriffszahl multipliziert und ins Verhältnis mit der Tangentialkraft gesetzt und berechnet sich wie folgt:

$$b = \frac{F_t}{F_{tspezi} * z_e} \quad (4)$$

Das Übersetzungsverhältnis ist das Verhältnis zwischen Antriebs- und Abtriebsdrehzahl und berechnet sich wie folgt:

$$i = \frac{n_1}{n_2} \quad (5)$$

Aus der Kinematik ist bekannt, dass sich die Geschwindigkeit nach:

$$v = \frac{s}{t} \quad (6)$$

also die Strecke, die in einer bestimmten Zeit zurückgelegt wird, berechnet.

Die Beschleunigung wiederum berechnet sich nach:

$$a = \frac{v}{t} \quad (7)$$

also in welcher Zeit die Geschwindigkeit erreicht wird. Stellt man Formel (6) nach der Zeit um und setzt diese in Formel (7), erhält man die Formel (8) zur Berechnung der Beschleunigung als Abhängige von der Geschwindigkeit und der Strecke.

$$a = \frac{v^2}{s} \quad (8)$$

Das abgegebene Drehmoment wird mittels Kraft multipliziert mit dem Hebelarm nach Formel (9) berechnet.

$$M_2 = F * 0,5 * d \quad (9)$$

2.4 Schutzklassen

Die Schutzklassen beschreiben den Schutz von Dichtungen gegen das Eindringen von festen Fremdkörpern und Wasser. Dazu werden unterschiedliche Klassen definiert, die nach IP gestaffelt werden. Definiert werden zwei Ziffern, die zusammen mit der Abkürzung IP die Schutzklasse bestimmen. IP steht dabei für Ingress Protection (deutsch: Schutz gegen Eindringen). Die erste Ziffer gibt die Klasse für den Schutz gegen das Eindringen von festen Fremdkörpern und die zweite den Schutz gegen das Eindringen von Wasser an. Die entsprechenden Normen sind die DIN 40 050 Teil 9 und die DIN EN 60529. Im Folgenden ist diese nach einer Internetquelle²⁰ Tabelle 6 zitiert worden.

Tabelle 6 Schutzklassen nach DIN 40 050 Teil 9 und DIN EN 60529

Erste Kennziffer	Schutz gegen feste Fremdkörper	Zweite Kennziffer	Schutz gegen Eindringen von Wasser
0	Kein Schutz	0	Kein Schutz
1	Geschützt gegen feste Fremdkörper von 50mm Durchmesser und größer. Geschützt gegen den Zugang zu gefährlichen Teilen mit dem Handrücken.	1	Senkrecht fallende Tropfen dürfen keine schädliche Wirkung haben.
2	Geschützt gegen feste Fremdkörper 12,5mm Durchmesser und größer.	2	Senkrecht fallende Tropfen dürfen keine schädliche Wirkung haben, wenn das Gehäuse um einen

²⁰ http://galaxy.weidmueller.com/configurator/pdfs/hdc/Schutzarten_DE.pdf

	Geschützt gegen den Zugang zu gefährlichen Teilen mit dem Finger.		Winkel bis zu 15° beiderseits der Senkrechten geneigt ist.
3	Geschützt gegen feste Fremdkörper 2,5mm Durchmesser und größer. Geschützt gegen den Zugang zu gefährlichen Teilen mit einem Werkzeug.	3	Wasser, das in einem Winkel bis zu 60° beiderseits der senkrechten gesprüht wird, darf keine schädlichen Wirkungen haben.
4	Geschützt gegen feste Fremdkörper 1mm Durchmesser und größer. Geschützt gegen den Zugang zu gefährlichen Teilen mit einem Draht.	4	Wasser, das aus jeder Richtung gegen das Gehäuse spritzt, darf keine schädlichen Wirkungen haben.
5	Staubgeschützt, Eindringen von Staub ist nicht vollständig verhindert, aber Staub darf nicht in einer solchen Menge eindringen, dass das zufriedenstellende Arbeiten des Gerätes oder die Sicherheit beeinträchtigt werden.	5	Wasser, das aus jeder Richtung als Strahl gegen das Gehäuse gerichtet ist, darf keine schädlichen Wirkungen haben.
6	Staubdicht, kein Eindringen von Staub	6	Wasser, das aus jeder Richtung als starker Strahl gegen das Gehäuse gerichtet ist, darf keine schädlichen Wirkungen haben.
-	-	7	Wasser darf nicht in einer Menge eintreten, die schädliche Wirkungen verursacht, wenn das Gehäuse unter genormten Druck- und Zeitbedingungen zeitweilig in Wasser getaucht wird.
-	-	8	Wasser darf nicht in einer Menge eintreten, die schädliche Wirkungen verursacht, wenn das Gehäuse dauernd unter Wasser

			getaucht wird unter Bedingungen, die zwischen Hersteller und Anwender vereinbart werden müssen. Die Bedingungen müssen jedoch schwieriger sein als unter Kennziffer 7.
--	--	--	--

Zusätzlich gibt es noch eine IP 69K Bezeichnung, die sich für den Einsatz unter extremen Umwelteinflüssen eignet. Die hohe Schutzart garantiert einen störungsfreien Betrieb. Ein Beispiel IP 65 bedeutet nach Tabelle 6, dass die Dichtung staubdicht ist und Wasser, das aus jeder Richtung als Strahl gegen das Gehäuse gerichtet ist, keine schädlichen Wirkungen haben darf.

3 Praxisteil

Die im Theorieteil beschriebene Konstruktionsmethodik wird auf die in der Einleitung beschriebene Problemstellung angewendet.

3.1 Situationsanalyse

Die Maschine DCSV 5000 ist zurzeit aus dem Maschinensortiment der Tipper Tie technopack GmbH genommen. Maschinen, die bereits in der Produktion sind, werden bei Beschädigungen der Linearachse MLEKC mit einer neuen ausgestattet. Dadurch ist das Problem kurzfristig behoben und der Kunde kann weiter produzieren. Allerdings ist dies keine ausreichende Lösung. Die Probleme mit der Linearachse MLEKC müssen in ihrer Entstehung verhindert oder ersetzt werden. In der aktuellen Konfiguration ist das Federstahlblech nach einiger Zeit defekt, wodurch keine Dichtwirkung mehr gewährleistet werden kann. Zusätzlich kommt es zu einer Längenänderung des Zahnriemens, wodurch der Arbeitsschritt des Verdrängens nicht mehr ausgeführt werden kann. Des Weiteren gibt es Fälle, bei denen die Kugelschienenführung beschädigt wurde. In allen Schadensfällen kommt es zum kompletten Ausfall der Maschine DCSV 5000. Die Folgen daraus sind Kundenunzufriedenheit und Imageverlust der Tipper Tie technopack GmbH.

3.2 Funktionsanalyse

Bei der Betrachtung der Linearachse MLEKC sind folgende Grundfunktionen ermittelt worden, die bei einer Neukonstruktion beachtet werden müssen. Die Funktionselemente sind wie folgt gegliedert:

- Antrieb
- Übertragung
- Dichtung
- Schmierung
- Führung

Die Linearachse MLEKC hat einen elektrischen Antrieb. Die Übertragung erfolgt über einen Zahnriemen. Abgedichtet ist die Linearachse MLEKC nach IP 65 mittels eines Dichtwerkstoffs und eines Federstahlblechs. Die Schmierung des Systems erfolgt mittels Schmierfett über einen Schmiernippel. Geführt wird das Verbindungselement über eine Kugelschienenführung.

3.3 Fehlermöglichkeitseinflussanalyse

Tabelle 7 FMEA

Linearachse MLEKC								Stammdaten				
Funktionen	mögliche Fehler			derzeitiger Zustand				verbesserter Zustand				
	Fehlerbeschreibung	Folgen	Ursache	A	B	C	R P Z	Korrektur	A	B	C	R P Z
Dichtung	Riss im Federstahlblech	Austritt von Schmiermittel	Einwirkung von außen	8	8	10	640					
Übertragung	Längenänderung des Zahnriemens	Funktionsausfall	Auslegungsfehler	4	8	10	320					
Führung	Beschädigung der Kugelschienenführung	Funktionsausfall	Parallelitätsfehler Verschleiß der Gleitlagerung	2	8	7	112					
Antrieb	Ausfall der Motorfunktion	Funktionsausfall	Überlast	8	8	4	256					
Schmierung	Schmiermittelaustritt	erhöhte Reibung	beschädigte Dichtung	8	8	8	512					

In der Tabelle 7 sind die Schwachstellen der Linearachse MLEKC tabellarisch aufgeführt und die Risikoprioritätszahl wird ermittelt. Dieser Wert wird später mit dem verbesserten Zustand verglichen. An der RPZ ist zu erkennen, dass die Dichtung der Linearachse MLEKC eine kritische Komponente ist. Der Fehler tritt durch äußere Einwirkung auf das Federstahlblech auf (siehe Abbildung 10). Während des Betriebes wird die Druckstelle dauernd über die Umlenkung der Zahnscheibe gebogen. Die dabei auftretenden Biegewechselspannungen führen zum Riss des Federstahlblechs, wodurch die Dichtigkeit nicht mehr gegeben ist.

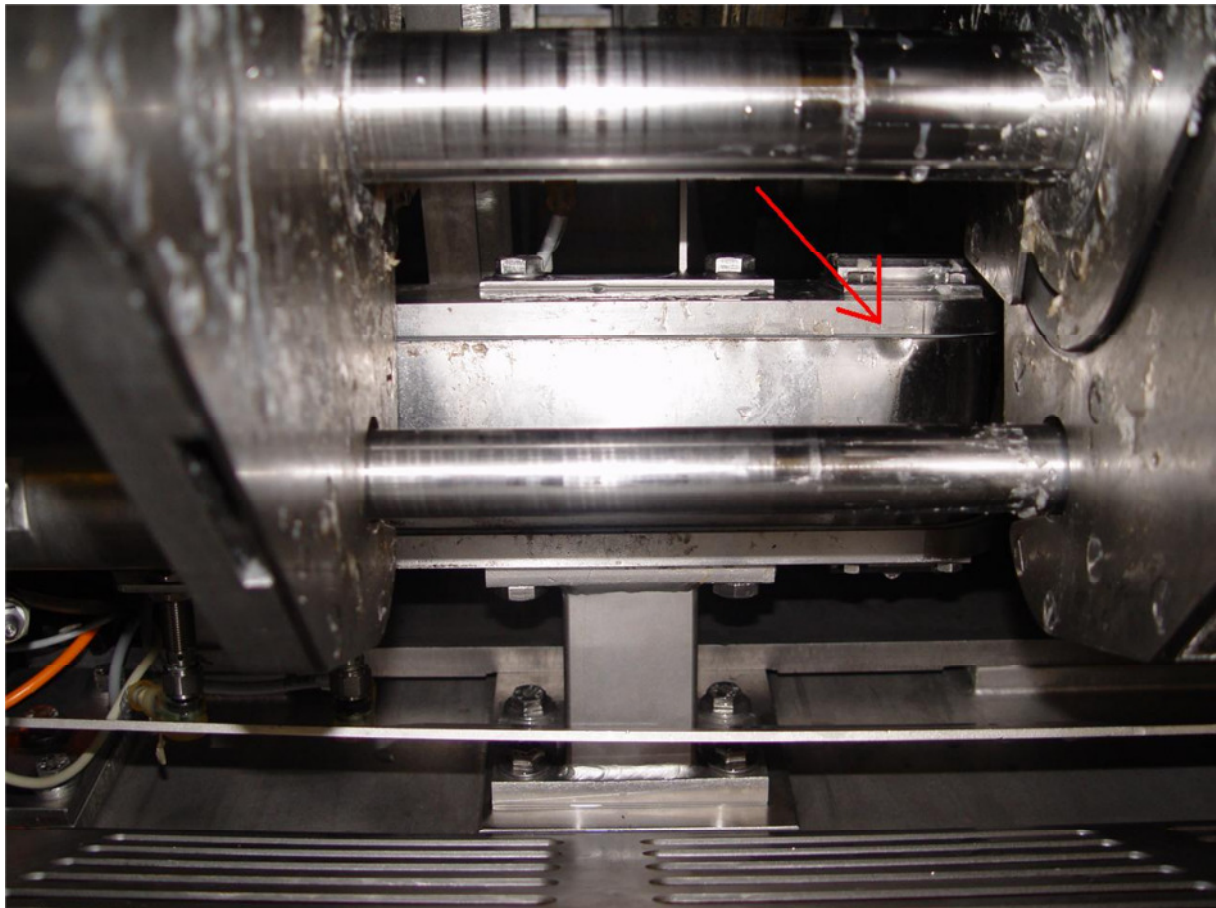


Abbildung 10 Federstahlblech²¹

Die Übertragung mittels Zahnriemen ist ebenfalls zu überdenken. Die Längenänderung des Zahnriemens kann auf eine Lastüberschreitung zurückgeführt werden. Um diese Aussage zu belegen, sind dazu die folgenden Berechnungen durchgeführt worden. Zum einen eine Auslegungsrechnung mit statischen Daten (Herstellerangaben) und zum anderen mit dynamischen Daten (Betriebsdaten). Anhand der Laufleistung des Zahnriemens ist die Längenänderung nicht zu erklären, da der Fehler spontan auftritt und nicht etwa nach einer gewissen Betriebsstundenzahl.

²¹ zur freien Verfügung von der Tipper Tie technopack GmbH

Auslegungsrechnung mit statischen Daten

Es wird ein Zahnriemen 60AT10 verwendet. Aus der Riementeknik ist zu entnehmen, dass dieser Riemen eine Breite von 60mm, eine Teilung von 10mm und ein AT Profil (trapezförmig) besitzt.

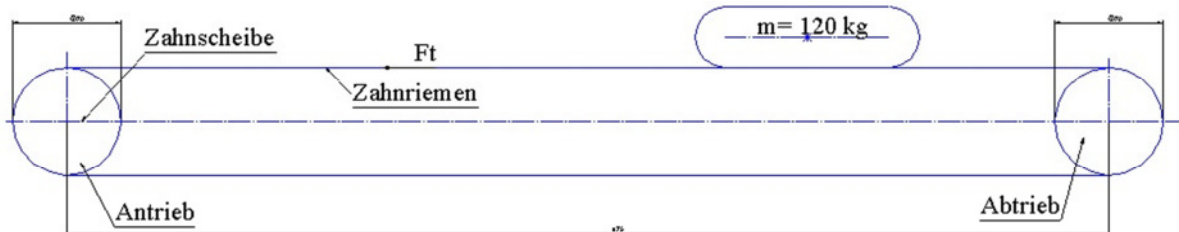


Abbildung 11 Prinzip Skizze der Zahnriemenanordnung

Abbildung 11 stellt die Wirkungslinie der Tangentialkraft dar. Außerdem ist die anzutreibende Masse sowie An- und Abtriebsseite dargestellt.

Gegeben:

Masse m : 120 kg

Wellenabstand e : 675mm

Beschleunigung max. a : 50 m/s²

Geschwindigkeit v : 5m/s

Reibungskoeffizient μ : 0,7

Zahnscheibendurchmesser d : 70mm

Mit Formel (1) und der Berücksichtigung einer horizontalen Bewegung berechnet sich die Tangentialkraft:

$$F_t = m * a + m * g * \mu = 120 \text{ kg} * \frac{50 \text{ m}}{\text{s}^2} + 120 \text{ kg} * \frac{9,81 \text{ m}}{\text{s}^2} * 0,7 = 6824 \text{ N}$$

Die Drehzahl berechnet sich nach Formel (2). Es wird davon ausgegangen, dass die Geschwindigkeit konstant bleibt.

$$n = \frac{v}{d * \pi} = \frac{5 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,07 \text{ m} * \pi} * 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} = 1364 \text{ 1/min}$$

Aus den Herstellerangaben des Zahnriemens ist die spezifische Zahnkraft bestimmt worden. Dazu wird die Tabelle 8 benötigt.

Tabelle 8 Spezifische Zahnkräfte abhängig von der Drehzahl²²

Drehzahl n (min ⁻¹)	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900
F _{tspezi} (N/cm)	52.20	50.80	49.50	48.30	47.20	46.20	45.20	44.30	43.40	42.60	41.80	41.00

Mit der oben berechneten Drehzahl wird in Tabelle 8 die spezifische Zahnkraft abgelesen. Bei einer Drehzahl von 1364 1/min wird bei 1400 1/min eine spezifische Zahnkraft von

$$F_{tspezi} = 45,20 \frac{N}{cm}$$

abgelesen. Das Wählen einer höheren als der berechneten Drehzahl kann als Sicherheitszuschlag angesehen werden. Mit Formel (3) wird die Anzahl der im Eingriff befindlichen Zähne berechnet.

$$z_e = \frac{z_k \cdot \beta}{360^\circ} = \frac{28 \cdot 180^\circ}{360^\circ} = 14$$

Nach Aussage des Riemenherstellers können allerdings nur 12 Zähne als tragend angesehen werden. Einschlägige Literatur [Muhs, Dieter : Wittel, Herbert : Jannasch, Dieter : Voßiek, Joachim : Roloff/Matek Maschinenelemente . 18. Wiesbaden : Vieweg Verlag : 2007 Seite 599] begründet das mit unvermeidlichen Teilungsfehlern. Mit Formel (4) und Zahneingriffszahl von 12 wird die Riemenbreite berechnet.

$$b = \frac{F_t}{F_{tspezi} \cdot z_e} = \frac{6824N}{45,20 \frac{N}{cm} \cdot 12} = 125,8 \text{ mm}$$

Es lässt sich festhalten, dass der Zahnriemen für den maximalen Lastzustand nicht korrekt ausgelegt ist, weil die vorhandene Riemenbreite kleiner ist als die berechnete Riemenbreite. Nun folgt eine motorseitige Berechnung. Drei Fahrprofile sind wie folgt gegliedert. Als erstes wird das variable Rafferpaar vom Referenzpunkt aus auf -12mm gefahren. Nach dem Schließen des variablen und festen Rafferpaars wird das zweite Fahrprofil abgefahren, wodurch das variable Rafferpaar auf 68mm für das Spreizen fährt. Das dritte Fahrprofil ist dann für das locker Füllen auf 68mm + Xmm für 0mm > X < 320mm.

²² http://www.nk-gmbh.de/NK_GmbH/5/Riemen/5_1.php?key=10

Auslegungsrechnung mit dynamischen Daten

Die folgenden Angaben sind die maximalen Daten, die im Betriebszustand erreicht werden. Ausschlaggebend ist die maximale Beschleunigung.

Gegeben²³:

Abtriebsdrehmoment M_2 : 103 Nm

Bemessungsdrehzahl des Motors n_1 : 3525 1/min

Übersetzung des integrierten Getriebes i : 14,286

Kürzeste zurückzulegende Strecke s : 12 mm

Im Unterschied zu der vorherigen Rechnung wird nun der reale Fall betrachtet. Hierbei wird die Geschwindigkeit über eine variable Drehzahl eingestellt. Dabei ist zu beachten, dass es sich um einen Servomotor mit integriertem Getriebe handelt. Der Motor wird über einen 8kHz-Umrichter geregelt. Die Drehzahl ist in diesem Betriebszustand auf 50% der Nenndrehzahl/Bemessungsdrehzahl des Servomotors gedrosselt. Dies ist aus Referenzgründen mit anderen Maschinenfunktionen festgelegt worden. Die Abtriebsdrehzahl berechnet sich wie folgt nach Umstellen von Formel (5).

$$n_2 = \frac{n_1}{i} = \frac{3525 \text{ 1/min}}{2 * 14,287} = 123,36 \text{ 1/min}$$

Der Divisor zwei berücksichtigt die 50 % Nutzung der möglichen Leistung des Motors.

Nach Umstellung von Formel (2) erhält man die Geschwindigkeit.

$$v = n * d * \pi = 123,36 \frac{1}{\text{min}} * 0,07\text{m} * \pi * \frac{\text{min}}{60\text{s}} = 0,45\text{m/s}$$

Auf der kürzesten zurückzulegenden Strecke findet die maximale Beschleunigung statt. Daher wird nach Formel (8) die Beschleunigung berechnet:

$$a = \frac{v^2}{s} = \frac{\left(0,45 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{0,012\text{m}} = 17,04 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

²³ Produktkatalog Lenze Drive Systems GmbH G-motion MC05/2007

Tabelle 9 Spezifische Zahnkräfte abhängig von der Drehzahl²⁴

Drehzahl n (min ⁻¹)	0	20	40	60	80	100	200	300	400	500	600	700
F _{tspezi} (N/cm)	73.50	72.40	71.40	70.50	69.60	68.70	65.00	62.10	59.50	57.40	55.50	53.70

$$\text{Mit } a = \frac{v^2}{s} = \frac{\left(0,45 \frac{m}{s}\right)^2}{0,012m} = 17,04 \frac{m}{s^2}$$

Tabelle 9 und Tabelle 9 wurde wie oben bereits beschrieben eine spezifische Zahnkraft von

$$F_{tspez} = 65 \frac{N}{cm}$$

abgelesen. Mit Formel (1) wird wieder die Tangentialkraft berechnet.

$$F_t = m * a + m * g * \mu = 120 \text{ kg} * \frac{17,04m}{s^2} + 120 \text{ kg} * \frac{9,81m}{s^2} * 0,7 = 2868,46N$$

Die Zahnriemenbreite wird nach Formel (4) berechnet.

$$b = \frac{F_t}{F_{tspezi} * Ze} = \frac{2868,46N}{65 \frac{N}{cm} * 12} = 36,7 \text{ mm}$$

Die Zahnriemenbreite ist für den Betriebszustand korrekt ausgelegt. Der vorhandene Riemen hat eine Breite von 60mm, wobei mindestens 36,7mm benötigt werden. Die aufgebrachte Kraft des Servomotors an der Abtriebswelle lässt sich nun noch mit der benötigten Kraft vergleichen. Die aufgebrachte Kraft berechnet sich nach umstellen von Formel (9):

$$F_{aufgebracht} = \frac{M_2}{0,5 * d} = \frac{103 \text{ Nm}}{0,5 * 0,07} = 2942,85N$$

Da die aufgebrachte Kraft größer ist als die benötigte, kann man festhalten, dass der Motor korrekt ausgelegt ist.

In Abbildung 7 ist zu erkennen, dass die Linearachse MLEKC und die Achse parallel angeordnet sein müssen, damit eine problemlose Funktion gewährleistet ist. Wenn die Parallelitätsabweichung z.B. durch unsachgemäße Montage zu groß ist, wird die Kugelschienenführung beschädigt. Die Kugelschienenführung in der Linearachse MLEKC ist das schwächere Glied im Vergleich zur Achse.

²⁴ http://www.nk-gmbh.de/NK_GmbH/5/Riemen/5_1.php?key=10

Daher ist es wahrscheinlich, dass eher die Kugelschienenführung anstelle der Achse verformt wird. Zusätzlich können durch Verschleiß der Gleitlagerung von der Hülse auf der Achse (siehe Abbildung 7) unerwünschte minimale Querkräfte und Drehmomente auftreten.

3.4 Marktanalyse

Im Folgenden sind die Rechercheergebnisse der Marktanalyse geordnet aufgelistet beschrieben. Bei der Marktanalyse wurde nicht nur nach Linearachsen recherchiert, sondern auch nach Bauteilen, die für eigene Ideen verwendet werden können.

3.4.1 Linearachsen

Folgend wird eine Kugelumlaufspindel zur Umsetzung einer Drehbewegung in eine Linearbewegung vorgestellt.

Kugelumlaufspindel



Abbildung 12 Kugelumlaufspindel²⁵

²⁵ http://img.directindustry.de/images_di/photo-g/kugelgewindetrieb-28821.jpg

Abbildung 12 zeigt den inneren Aufbau. Zu erkennen ist, dass die Kugeln in den Gewindegängen der Spindel und in einer Hülse gelagert sind. Dadurch erreicht man einen geringen Reibungswiderstand, eine hohe Kraftübertragung und Positionsgenauigkeit. Kugelumlaufspindeln werden bis zu einer Schutzklasse von IP 65 angeboten. Dies ist für den gewünschten Anwendungszweck geeignet. Der größte Teil der Spindel ist jedoch nicht abgedichtet. Dies bedeutet, dass nach jeder Reinigung ein Nachschmieren durchgeführt werden müsste, da sonst der Schmierstoffvorrat, der vom Werk aus an den Kugeln ist, zu schnell verbraucht werden würde. Das Nachschmieren über Schmiernippel erhöht den Wartungsaufwand. Hinzu kommen erhebliche konstruktive Änderungen für den Servomotor oder ein zusätzliches Getriebe. Die Achse des Servomotors ist vertikal angeordnet, während die Kugelumlaufspindel horizontal montiert wird.

Strahlwassergeschützter Einachsenroboter ISWA/ISPA



Abbildung 13 Einachsenroboter ISWA/ISPA²⁶

Die Firma Schlüter Automation und Sensorik GmbH bietet einen Strahlwasser geschützten Einachsenroboter ISWA/ISPA an. In dem dargestellten Gehäuse in Abbildung 13 ist eine Kugelumlaufspindel wie in Abbildung 12 montiert. Das Gehäuse bietet die Schutzklasse IP 65, wenn es in der Position, wie in Abbildung 13 dargestellt ist, montiert wird. Das Gehäuse minimiert auch den Schmierungs- und Wartungsaufwand, der bei einer offenen Kugelumlaufspindel (vgl. Abbildung 12) auftritt. Nachteilig ist zum einem, dass die Schutzklasse nur durch Überdruck, das heißt durch das

²⁶ http://linearachsen.schluer-automation.de/Kataloge/ISWA_IP65_deu.pdf

Ansaugen von Luft, erreicht wird. Zum anderen ist dem Datenblatt²⁷ zu entnehmen, dass die axialen Kräfte nicht ausreichen. Zusätzlich entspricht die eben beschriebene Einbauposition nicht der benötigten Position, wodurch die Schutzklasse IP 65 nicht mehr erreicht wird.

Hygienic Aktuator

Der Hygienic Aktuator von Dunkermotoren (Abbildung 14) funktioniert mit einer Stange und einem Spulenkörper (Aktuator), der ein Magnetfeld generiert. Der Aktuator führt die Hubbewegung aus. Das System bietet die Schutzklasse IP 67 und optional IP 69K für den Hygienebereich. Die Spulen, die zur Erzeugung des Magnetfeldes nötig sind, sind eingegossen und daher gegen äußere Einflüsse geschützt. Die Edelstahlstange ist mit Seltenerd magneten gefüllt. Steuerungstechnisch können Inkrementalencoder oder digitale Hallsignale verwendet werden.²⁸ Dadurch ist der Betrieb an beliebigen Steuerungen möglich. Ein nachteiliger Punkt ist, dass der Hygienic Aktuator möglichst zentrisch auf der Magnetstange positioniert werden muss. Die Positionierung des Spulenkörpers muss durch eine zusätzliche Konstruktion erfolgen, weil sowohl der Spulenkörper Abbildung 14 und das Verbindungselement bzw. die Gabel in Abbildung 7 spielend gelagert sind.

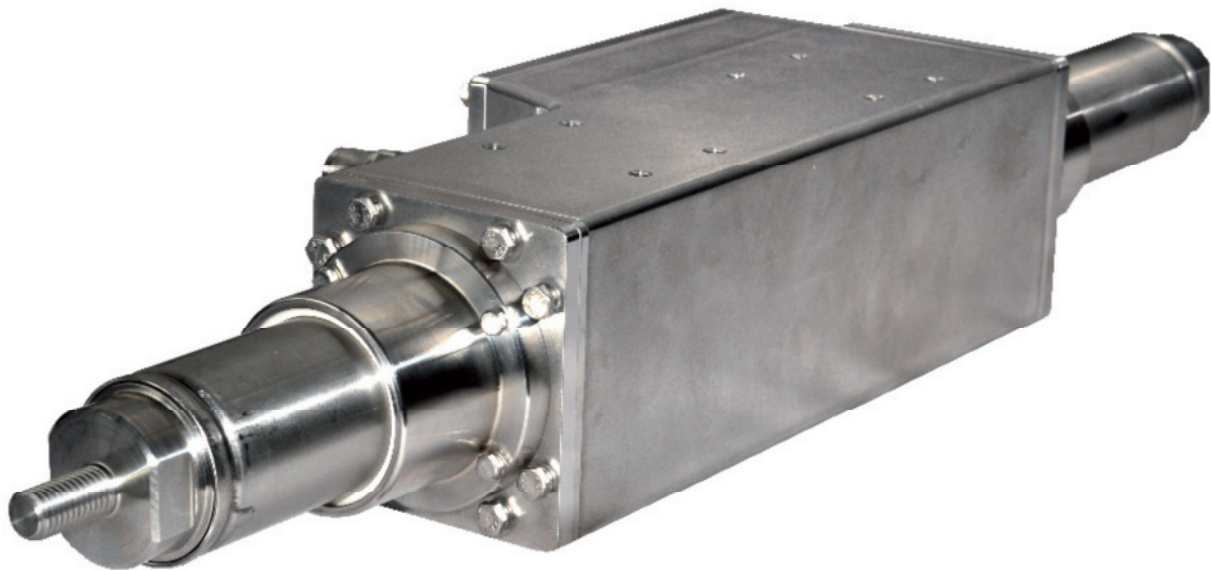


Abbildung 14 Hygienic Aktuator²⁹

²⁷ http://linearachsen.schlueter-automation.de/Kataloge/ISWA_IP65_deu.pdf

²⁸ http://www.dunkermotoren.de/data/linearsysteme/downloads/DS01102_DE.pdf

²⁹ http://www.dunkermotoren.de/data/linearsysteme/downloads/DS01102_DE.pdf

3.4.2 Pneumatikzylinder

Abbildung 15 zeigt eine pneumatische Linearachse. Das System ist druckluftbetrieben. Durch die kolbenstangenlose Ausführung ist die Bauweise kompakt. Bei herkömmlichen Pneumatikzylindern wie in Abbildung 16 wird die doppelte Gehäuselänge benötigt, da der Kolben ausgefahren wird. Der entscheidende Nachteil allerdings ist, dass das System bzw. alle pneumatischen Zylinder nur die beiden Positionen an den Endlagen anfahren können, da der steuerungstechnische Aufwand für beliebige Zwischenpositionen zu hoch ist. Der Grund dafür ist unter anderem, dass eine mechanisch/pneumatisch permanente Positionsabfrage erfolgen muss. Zudem werden die Zwischenpositionen eine ungenaue Positionsgenauigkeit und Wiederholgenauigkeit haben.

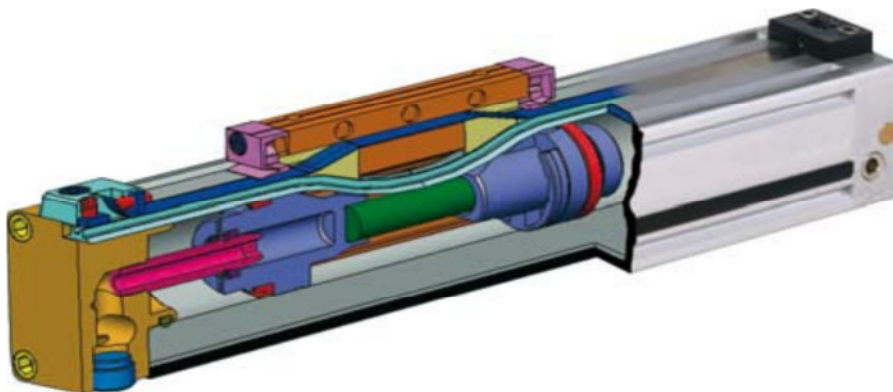


Abbildung 15 Kolbenstangenloser Zylinder³⁰



Abbildung 16 Pneumatikzylinder³¹

³⁰ <http://www.pneumatikwelt.de/Kap7Atlas7.pdf>

³¹ http://img.directindustry.de/images_di/photo-g/standard-pneumatischer-zylinder-120959.jpg

3.5 Pflichtenheft

Als Basis für die Konzeptionierung dient Tabelle 10. Die Klassifizierung erfolgt nach Forderung (F), Wunsch (W) und Unklarheit (U).

Tabelle 10 Pflichtenheft

Lfd. Nr.	Sachgebiet	Klassifikation nach F,W
0	Allgemeines	
0.1	Abmessungen kleiner oder gleich $a \times b \times c = 94\text{mm} \times 775\text{mm} \times 80\text{mm}$	W
0.2	Einsatz des vorhandenen elektrischen Antriebes	W
0.3	Senkrechter Einbau von Achsen und Wellen	W
0.4	Energieverbrauch kleiner oder gleich dem momentanen Energieverbrauch	W
1	Funktionen	
1.1	Stufenloser linearer Hub 400mm	F
1.3	Wiederholgenauigkeit mind. $\pm 0,1\text{mm}$	F
1.4	Einstellmöglichkeit von Beschleunigung, Geschwindigkeit, Entfernung	F
1.5	Beschleunigung von max. 50 m/s^2 möglich	W
1.6	Geschwindigkeit von 5 m/s möglich	W
2	Werkstoffe	
2.1	Korrosionsbeständig	F
2.2	Verschleißfest	W
3	Schmierung	
3.1	Dauerschmierung mit Dichtung	U
3.2	Nachschmieren ohne Dichtung	U
3.3	Nachschmieren mit Dichtung	U
3.4	Selbtschmierung ohne Dichtung	W
4	Dichtung	
4.1	IP 65 nach DIN 40 050 Teil 9 und die DIN EN 60529	F
5	Führung	
5.1	Kompensiert Querkräfte und Momente durch mögliche Parallelitätsfehler und Spiel der Achse(n)	F

6	Sonstiges	
6.1	Geringer Produktionsaufwand	W
6.2	Geringer Montageaufwand	W
6.3	Geringer Wartungsaufwand	W
6.4	Geringer Reinigungsaufwand	W

3.6 Kreativphase

In der Kreativphase werden mittels der Problemlösungsmethoden Konzepte gebildet. Dazu werden ein Brainstorming sowie eine Analogiebetrachtung durchgeführt und ein morphologischer Kasten erstellt.

3.6.1 Brainstorming

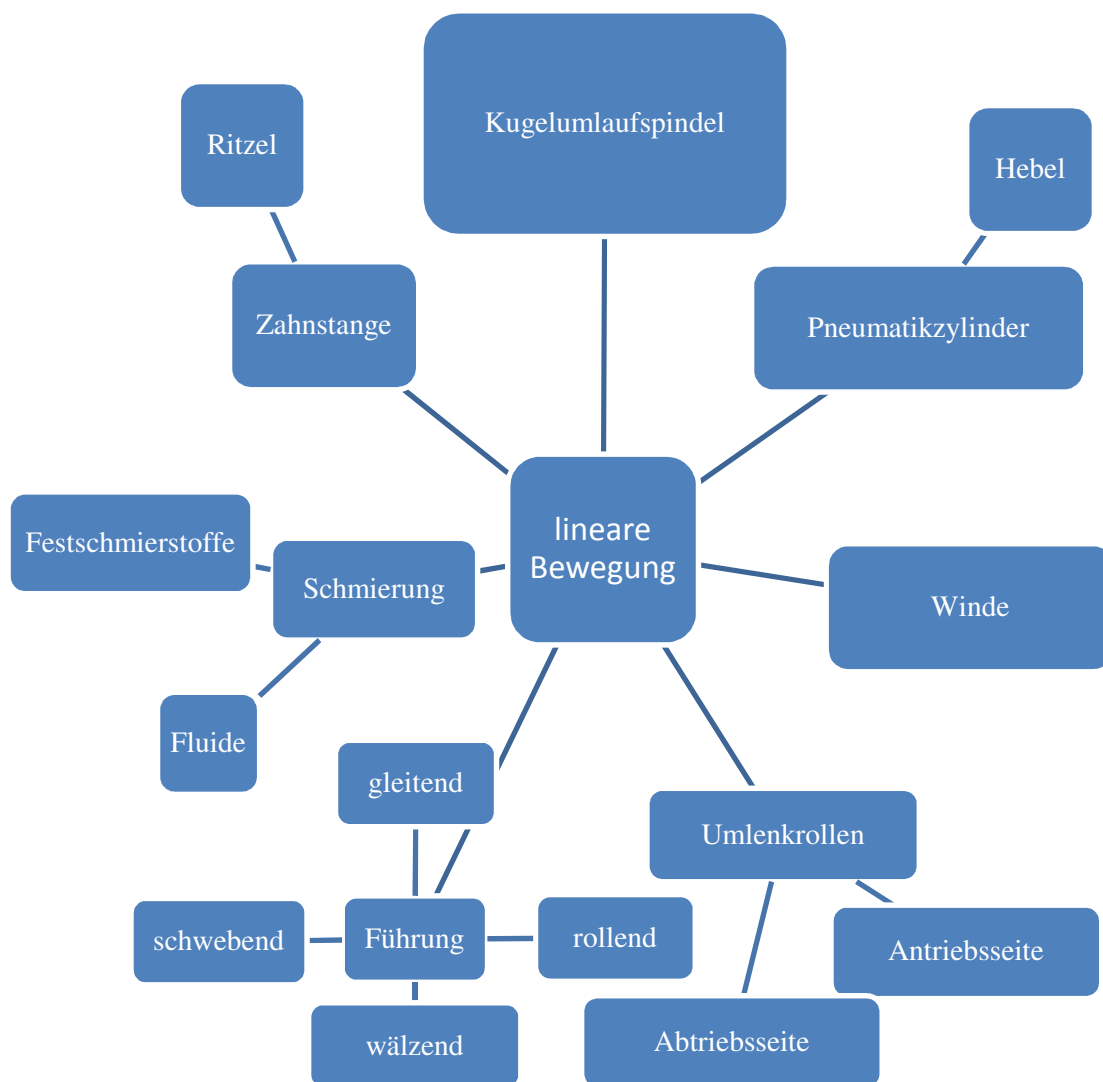


Abbildung 17 Mindmap

Abbildung 17 zeigt das Brainstorming als Mindmap. Die Konzepte, die geeignet erscheinen, werden im Folgenden vorgestellt. Eine Zahnstange mit einem Ritzel ist ein bekanntes System zur Umsetzung einer Dreh- in eine Linearbewegung. Die Zahnstange ist fest montiert, während das Ritzel durch einen Motor angetrieben wird und sich somit auf der Zahnstange abwälzt. Umzusetzen ist diese Variante nicht, da der Platz für Motor und Ritzel in der Maschine DCSV 5000 nicht zur Verfügung steht. Auch der Antrieb der Zahnstange ist auf Grund des daraus entstehenden doppelten Hubes und dem daraus folgenden erhöhten Platzbedarf nicht umzusetzen. Zusätzlich ist hier auch ein erhöhter Schmierungs- bzw. Wartungsaufwand erforderlich, weil zwischen Zahnstange und Ritzel eine wälzende Bewegung auftritt, die ohne Schmierung den Verschleiß erheblich erhöht.

Abbildung 18 funktioniert mit zwei synchron ausfahrenden Zylindern, die ein Hebelsystem bewegen. Die Nachteile einer pneumatischen Lösung sind bereits in 3.4.2 dargestellt worden. Gleiches gilt auch für die Pneumatikzylinder in Abbildung 18, weil zum einen die Zwischenpositionen angefahren und zum zweiten ein synchrones Ein- und Ausfahren der Pneumatikzylinder steuerungstechnisch erreicht werden muss. An den Knotenpunkten der Hebel werden Gelenke montiert, die geschmiert werden müssen. Eine Möglichkeit wäre, das System als ein offenes System einzusetzen. Allerdings müssen dann die Gelenke nach jeder Reinigung der Maschine DCSV 5000 nachgeschmiert werden. Das erhöht den Wartungsaufwand. Durch das Abdichten des Systems würde sich die Größe der Baugruppe erheblich erhöhen. Zur Darstellung der Größenverhältnisse ist eine Dimensionierung vorgenommen worden, die im Folgenden vorgestellt wird. Mit zwei Pneumatikzylindern von jeweils 50mm Hub, einem Abstand 110mm von Kolbenstirnfläche zu Kolbenstirnfläche, 100mm Hebelarmen und 5 Gelenken erreicht man den gewünschten Hub von 400mm. Im eingefahrenen Zustand erreicht die Höhe der Packung 90mm, ohne dass hier Materialstärken berücksichtigt worden sind. Generell lässt sich abschätzen, dass das System im offenen oder abdichtenden Zustand zu groß sein wird, da die gewünschten Abmaße aus Tabelle 10 nicht erreicht werden. Dazu kommt die Anzahl an Gelenken, die das Spiel des Systems erhöhen und die Positionsgenauigkeit negativ beeinflussen. Ein nicht unerheblicher Montage- und Produktionsaufwand ist ebenfalls zu erwarten.

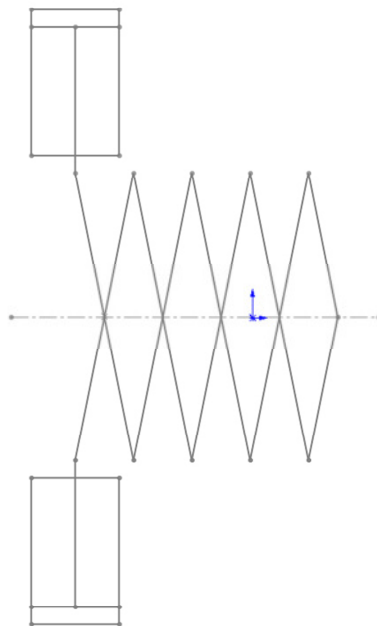


Abbildung 18 Synchroner Pneumatikzylinder mit Hebeln

Abbildung 19 zeigt eine Skizze mit zwei links und rechts des Hubes angeordneten Elektromotoren mit jeweils einer montierten Winde auf deren Wellen. Die untere horizontale Linie stellt die Führung des Systems dar. Die Führung ist indirekt schon an der Maschine DCSV 5000 (vgl. Achse in Abbildung 5) und somit auch eine Schmierung vorhanden. Bei der Verwendung der Achse in Abbildung 5 als Führung ist darauf zu achten, dass das Übertragungsglied am Schwerpunkt befestigt wird. Damit wird verhindert, dass ungewünschte Querkräfte und Drehmomente die Führung oder andere Bauteile beschädigen. Die oberen beiden Linien stellen Übertragungsglieder dar. Durch versetztes Ansteuern der Elektromotoren soll das Übertragungsglied auf der einen Seite aufgewickelt und auf der anderen abgewickelt werden. Dadurch wird der Hub in beide Richtungen erreicht. Alternativ kann dieses System mit einem Motor mit Bremse und einer Zugfeder, als Ersatz für den zweiten Motor, funktionieren. Dadurch kann eine Elektroachse eingespart und das System gleichwertiger mit der vorhandenen Antriebsart werden. Erheblicher Nachteil dieses Systems ist, dass sich das Übertragungsglied unter Belastung dehnt und dadurch nicht mehr genau die gewünschten Positionen angefahren werden können. Der Vorteil dieses Systems ist der einfache und platzsparende Aufbau und die Verwendung von Serienteilen (Motoren).

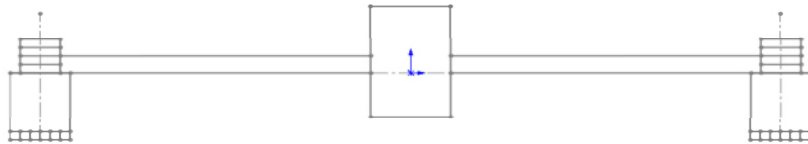


Abbildung 19 Elektrisch gesteuerte Linearachse

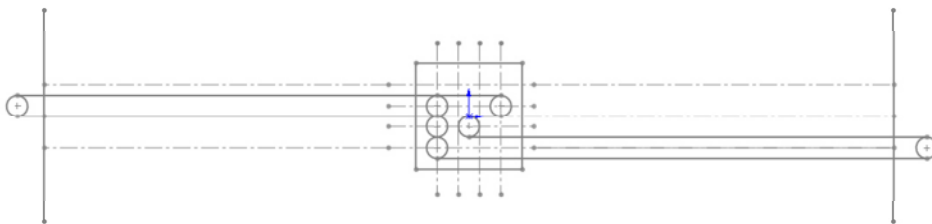


Abbildung 20 Umlenkrollen

Abbildung 20 zeigt eine Draufsicht auf ein System, dessen Hauptprinzip das Umlenken eines Übertragungsgliedes ist. Angetrieben wird eine der beiden äußeren Umlenkrollen. Dadurch wird das Übertragungsglied bewegt. Die Umlenkrollen führen das Übertragungsglied weiter und übertragen die Bewegung auf den Gleitschlitten. Durch den vertikalen Versatz des Übertragungsgliedes entsteht ein Drehmoment um den Schwerpunkt des Gleitschlittens, das mittels einer Führung aufgenommen werden muss. Das Übertragungsglied erfährt unter Belastung eine Längenänderung. Diese und das Spiel der Umlenkrollen wirken sich negativ auf die Positionsgenauigkeit aus. Die Umlenkrollen benötigen an ihren Lagerstellen einen Schmierstoff. Dazu werden z.B. Kunststoffbuchsen mit guten Schmiereigenschaften verwendet. Dies erspart auf Grund der selbständigen Schmierung eine Dichtung.

3.6.2 Analogiebetrachtung

Bei dem Einsatz eines Zahnriemens als Übertragungsglied in einem offenen System ist dessen chemische Beständigkeit das wichtigste Kriterium. Die chemische Beständigkeit ist nur mittels eines Quellversuchs zu ermitteln. Beim Quellversuch wird eine Probe in die Chemikalie gegeben und nach einer gewissen Zeit überprüft, ob die Probe aufgequollen ist. Die Chemikalien, die während der Reinigung der Maschine DCSV 5000 eingesetzt werden, sind allerdings so vielseitig, dass so ein Versuch nicht durchführbar ist. Es muss daher auf die allgemeine Herstelleraussage der chemischen Beständigkeit vertraut werden. Ein Poly Chain® Zahnriemen wird bereits an anderer Stelle der Maschine DCSV 5000 ohne Schutzvorrichtung eingesetzt. Auch die Firma Gates bestätigt die chemische Beständigkeit und die Eignung eines Poly Chain® Zahnriemens in der Lebensmittelindustrie³². Die Walther Flender Gruppe bietet einen Poly Chain® GT Karbon Zahnriemen an. Dieser zeichnet sich durch die Übertragung hoher Kräfte bei kompakter Bauweise aus.³³ Dadurch können letztlich Platz und Kosten gespart werden.

Industrieller Kunststoff "S"®³⁴

Der industrielle Kunststoff "S"® ist ein lebensmittelkonformer Kunststoff. Er ist auf Grund seiner Verschleißfestigkeit und der selbstständigen Schmierung besonders für Gleitlagerungen geeignet. Hinzu kommt, dass dieser Kunststoff chemisch beständig ist und erfolgreich in anderen Baugruppen der Maschine DCSV 5000 eingesetzt wird. Der Kunststoff kann als Alternative für übliche Schmiermittel verwendet werden.

³² http://www.gates.com/Germany/brochure.cfm?brochure=9755&location_id=13935

³³ <http://walther-flender-gruppe.de/de/produkte/zahnriemenantriebe/polychain-zahnriemen/zahnriemen-polychain-gt-carbon/>

³⁴ <http://www.murtefeldt.de/produkte/werkstoffe/technische-werkstoffe-1/original-werkstoff-s/>

Spannplatte



Abbildung 21 Zahnriemenspannplatte³⁵

In Abbildung 9 ist dargestellt, dass der Zahnriemen durchgebohrt worden ist. Der Zahnriemen wird auf Zug belastet. Dadurch steigt die Gefahr der Lochleibung und folglich eine Längenänderung des Zahnriemens. Mit Abbildung 21 können die Bohrungen im Zahnriemen verhindert werden. Dazu wird der Zahnriemen Abbildung 22 mit seinen Zahnflanken an die Zahnflanken der Abbildung 21 gefügt. Eine zweite Spannplatte wird mittels Montageschrauben mit der Zahnriemenspannplatte außerhalb des Riemens montiert (Abbildung 22).

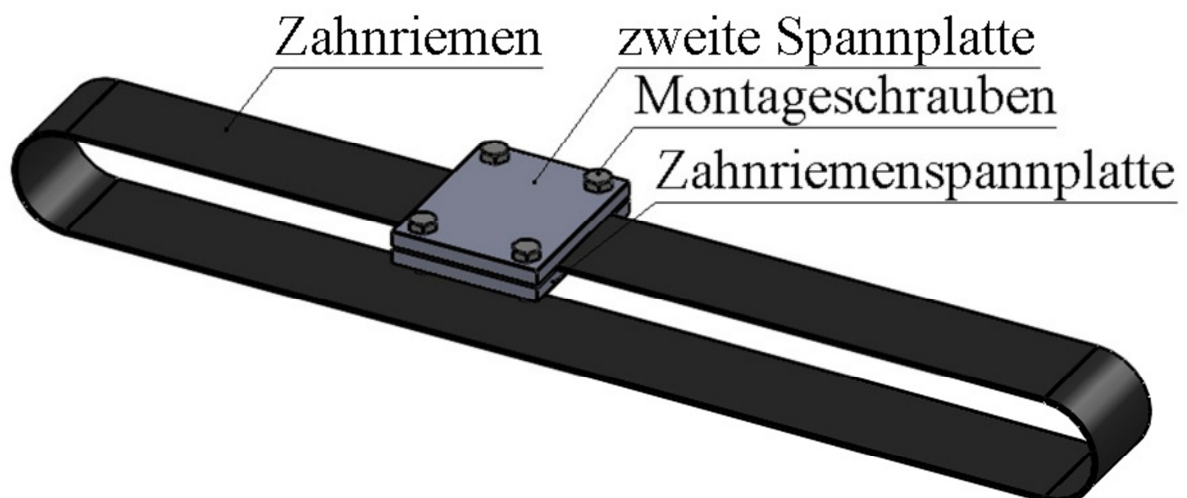


Abbildung 22 Aufbau mit Zahnriemenspannplatte

³⁵ <http://shop.haberkorn.com/repository/itempopup/0000FF41.jpg>

Es können durch die Verwendung eines Poly Chain® GT Karbon Zahnriemens höhere Kräfte als mit dem jetzigen verwendeten Riemen übertragen werden. Zweitens kann mit dem Kunststoff "S"® auf eine Kugelschienenführung, auf Schmierung und daraus folgend auch auf eine Dichtung verzichtet werden. Um das zu verdeutlichen, ist die entsprechende Konstruktion in Abbildung 23 dargestellt und im Folgenden beschrieben.

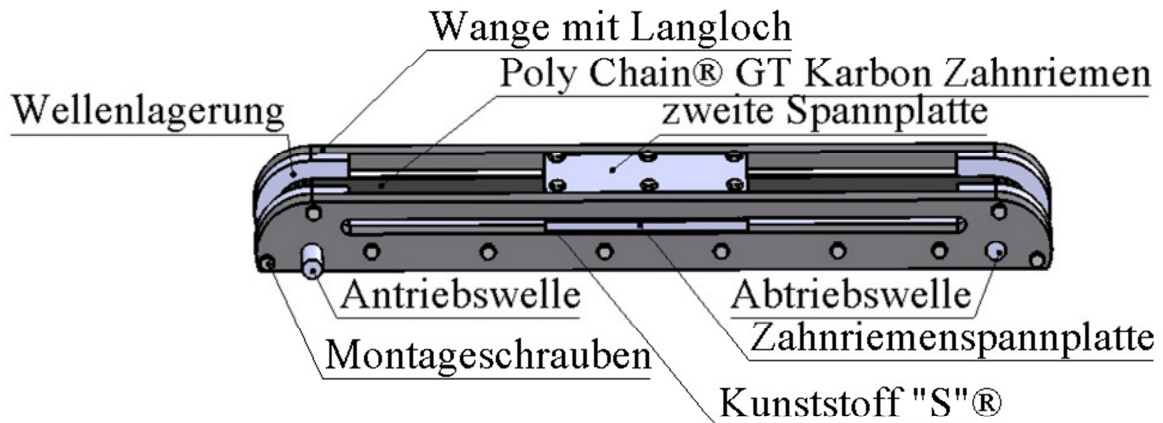


Abbildung 23 Abstrahiertes Zahnriemenmodell

Zu Beginn der Betrachtung von Abbildung 23 sind die Wangen mit Langloch zu erwähnen. Das Langloch ist das Kernelement zur Führung der Zahnriemenspannplatte mit verschraubter zweiter Spannplatte. Wie in Abbildung 22 dargestellt, sind die beiden Spannplatten miteinander verschraubt und klemmen dadurch den Poly Chain® GT Karbon Zahnriemen ein. In Abbildung 23 ist die Zahnriemenspannplatte breiter als die zweite Spannplatte. Dadurch gelangt die Zahnriemenspannplatte zu beiden Seiten in das Langloch. So wird erreicht, dass drei Anlageflächen pro Wange zur Verfügung stehen. Auf den Anlageflächen werden nun pro Wange sechs Scheiben aus dem Kunststoff "S"®, wie Abbildung 24 gezeigt, montiert.

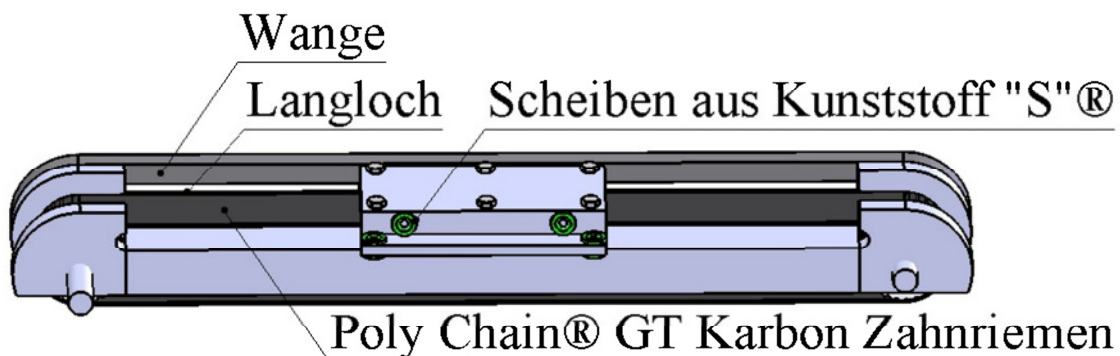


Abbildung 24 Darstellung der Scheiben

Durch die drei Anlageflächen bzw. durch die montierten Scheiben wird die Zahnriemenspannplatte mit der verschraubten zweiten Spannplatte optimal geführt. Auf Grund der selbstschmierenden Eigenschaft des Kunststoffes und der Verschleißfestigkeit werden niedrige Reibwerte erreicht. Außerdem bedarf es bei diesem Konzept keiner Dichtung, da der Zahnriemen und der Kunststoff chemisch beständig sind. Hinzu kommt, dass die Kugelschienenführung, wie sie in der Linearachse MLEKC vorhanden ist, durch eine Gleitführung ersetzt wird. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Größe des Konzepts (Abbildung 23) den Abmaßen des Pflichtenhefts entspricht. Die Reibung der Gleitführung ist voraussichtlich geringer als die Reibung der Dichtung der Linearachse MLKEC. Auf Grund wenig verwinkelter Bauteile ist die Konstruktion gut zu reinigen und der Wartungsaufwand auf ein Minimum beschränkt. Nachteilig ist, dass viele Bauteile selbst produziert werden müssen.

3.6.3 Morphologische Methode

Die morphologische Methode ist eine Zusammenstellung aller denkbaren Lösungen in tabellarischer Form. Dazu wird das Problem in Funktionselemente zerlegt und in einer Tabelle zeilenweise aufgelistet.³⁶ Nun werden zu jedem Funktionselement mögliche und bekannte Lösungen spaltenweise hinzugefügt. Durch kombinieren der einzelnen Lösungen erhält man viele verschiedene Gesamtkonzepte.

Tabelle 11 Morphologischer Kasten

	1	2	3	4
Antrieb	elektrisch	pneumatisch	hydraulisch	manuell
Übertragung	Zahnriemen	Magnet	Gewinde	Stange
Dichtung	nicht vorgesehen	vorgesehen	innen	außen
Schmierung	dauernd	keine	zentral	Intervall
Führung	schwimmend	gleitend	schwebend	rollend
Gesamtkonzept	Abbildung 23 Abstrahiertes Zahnriemenmodel	Abbildung 14 Hygienic Aktuator	Abbildung 16 Pneumatikzylinder	Abbildung 12 Kugelumlaufspindel

Tabelle 11 zeigt wie mit dem morphologischen Prinzip verfahren wird. Zu den Beispielen, die hier aufgezeigt sind, gibt es noch viele weitere Möglichkeiten, die zu einem Gesamtkonzept kombiniert

³⁶ Conrad, Peter : Schiemann, Hubert : G.Vömel, Paul : Erfolg durch methodisches Konstruieren . 1. Grafenau/Württ. : Lexika-Verlag : 1977


werden können. Diese vier Beispiele zeigen Gesamtkonzepte, die auch mit dem Brainstorming ermittelt wurden. Ein bisher noch nicht ermitteltes Konzept ist die Kombination aus elektrischem Antrieb, magnetischer Übertragung, Dichtung, Intervallschmierung und gleitender Führung. Dieses Konzept kann mit Abbildung 14 umgesetzt werden. Weitere Kombinationen sind möglich und müssen natürlich auf ihre Verwendbarkeit und Umsetzbarkeit geprüft werden.

3.7 Konzeptbewertung

Die Bewertungskriterien sind aus Tabelle 10 abgeleitet worden. Die Punkte Abmessungen kleiner oder gleich $a \times b \times c = 94\text{mm} \times 775\text{mm} \times 80\text{mm}$ und senkrechter Einbau von Achsen und Wellen sind im Bewertungskriterium Platzbedarf erfasst worden. Dieses Kriterium bekommt eine hohe Gewichtung, weil der zur Verfügung stehende Platz nicht erweitert werden kann und die Lage der Achse durch die Anordnung weiterer Baugruppen der Maschine DCSV 5000 vorgegeben ist. Das Kriterium Antrieb bezieht sich ebenfalls auf die Verwendung des vorhandenen Servomotors und würde der idealen Lösung entsprechen. Beim Energieverbrauch ist der ausschlaggebende Punkt das Medium, das zum Antreiben des Konzeptes verwendet wird. Die Genauigkeit und das Gewicht sind selbsterklärend. Das Kriterium Funktionsumsetzung ist mit der wichtigste Punkt in der Bewertung und hat daher auch die höchste Gewichtung. Es umfasst zum einen den stufenlosen 400mm Hub, die Wiederholgenauigkeit sowie Einstellmöglichkeiten von Beschleunigung, Geschwindigkeit und Entfernung. Außerdem sollen die maximalen Werte für Beschleunigung und Geschwindigkeit mit dem Konzept fahrbar sein. Das Bewertungskriterium Führung beinhaltet im Wesentlichen die Stabilität und die Verschleißfestigkeit der Führung und bekommt eine Gewichtung von 4. Die Schmierung und der Wartungsaufwand bekommen ebenfalls eine Gewichtung von 4. Bewertet werden diese Punkte in Korrespondenz nach Tabelle 12. Der Grund ist, dass die Schmierung und Dichtung eng mit dem Wartungsaufwand verknüpft sind. Ein Beispiel zur Verdeutlichung: die Kugelumlaufspindel aus Abbildung 12 ist ein System mit einer Dichtung und einer Intervallschmierung. Deshalb bekommt diese Lösung nach Tabelle 12 für die Schmierung und Wartung 2×4 (Gewichtung) = 8 Punkte.

Tabelle 12 Bewertungsmatrix Schmierung und Wartung

	Schmierung	Wartungsaufwand
Dauerschmierung mit Dichtung	1	3
Nachschmieren ohne Dichtung	0	0
Nachschmieren mit Dichtung	2	2
Selbtschmierung ohne Dichtung	3	4



Die geringe Reinigungs-, Produktions- und Montageaufwände bekommen eine Gewichtung von zwei, weil die Kosten, die damit verbunden sind, vorerst unbeachtet bleiben. Hier wird lediglich subjektiv bewertet. Zum Beispiel können Oberflächen und Winkel zur Reinigungsbewertung betrachtet werden. Mit den Grundlagen wird die Tabelle 13 erstellt. In der linken äußeren Spalte sind die Bewertungskriterien aufgelistet. In der oberen Zeile sind die Konzepte aufgelistet. Durch die Multiplikation der Bewertungspunkte mit der Gewichtung wird in die Berechnung der technischen Wertigkeit die Bedeutung der Bewertungskriterien einbezogen.

Tabelle 13 Bewertungsmatrix

Bewertungskriterien	Gewichtung	Kugelumlaufspindel Abbildung 12	Strahlwasser geschützter Einachsenroboter Abbildung 13	Hygienic Aktuator Abbildung 14	Pneumatikzylinder Abbildung 15 Abbildung 16	Zahnstange	Zahnriemen Abbildung 23	Synchron Pneumatikzylinder Abbildung 18	Elektrisch gesteuerte Linearachse Abbildung 19	Umlenkrollen Abbildung 20	Linearachse MLEKC Abbildung 8	ideale Lösung
Platzbedarf	4	12	8	16	0	0	12	0	0	0	16	16
Antrieb	4	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
Energieverbrauch	4	12	12	12	0	16	12	0	8	16	16	16
Genauigkeit	4	16	16	16	0	16	12	0	0	0	16	16
Gewicht	2	8	4	8	8	4	6	8	4	0	6	8
Führung	4	16	16	16	16	16	8	8	16	16	0	16
Schmierung	4	0	4	8	4	0	12	0	8	8	8	16
Wartungsaufwand	4	0	12	8	12	0	16	0	8	8	8	16
Produktionsaufwand	2	8	8	8	8	8	4	0	8	0	8	8
Montageaufwand	2	8	8	6	8	4	4	0	8	0	8	8
Reinigungsaufwand	2	8	8	8	8	4	8	0	8	6	8	8
Summe	-	104	112	122	80	84	110	32	84	70	110	144
technische Wertigkeit mit Gewichtung	-	0,72	0,78	0,85	0,56	0,58	0,76	0,22	0,58	0,49	0,76	1,00

3.8 Ergebnis

Das Konzept aus Abbildung 14 mit der Kombination aus der morphologischen Methode ist mit 85% das beste Ergebnis. Die Punktevergabe in Tabelle 13 begründet sich wie folgt. Für den Platzbedarf bekommt die Lösung 16 Punkte, weil kein Servomotor mehr nötig ist und damit das Bauvolumen erheblich reduziert wird. Das Bewertungskriterium Antrieb kann nur mit 16 Punkten bewertet werden. Der Grund dafür ist, dass kein Konzept aufgenommen wurde, das einen ungeeigneten Antrieb hat. Der Energiebedarf wird bei einem magnetischen Antrieb höher sein, als bei einem motorischen Antrieb. Auf Grund der gleichwertigen Genauigkeit mit der Linearachse MLEKC bekommt die magnetische Linearachse volle Punktzahl. Durch die Einsparung eines Servomotors wird das Gewicht erheblich reduziert, was die hohe Punktzahl begründet. Die Führung bekommt auf Grund der funktionellen Bestätigung an anderer Stelle der Maschine 16 von 16 Punkten. Schmierung und Wartungsaufwand sind nach Tabelle 12 mit der Zeile Nachschmieren mit Dichtung bewertet worden. Produktions-, Montage- und Reinigungsaufwand ist weniger wichtig. Auch hier kann die magnetische Linearachse durch weniger herzustellende Bauteile, einfache und schnelle Montage durch verschrauben und verschweißen sowie mit flachen, glatten, nichtrostenden Oberflächen überzeugen.

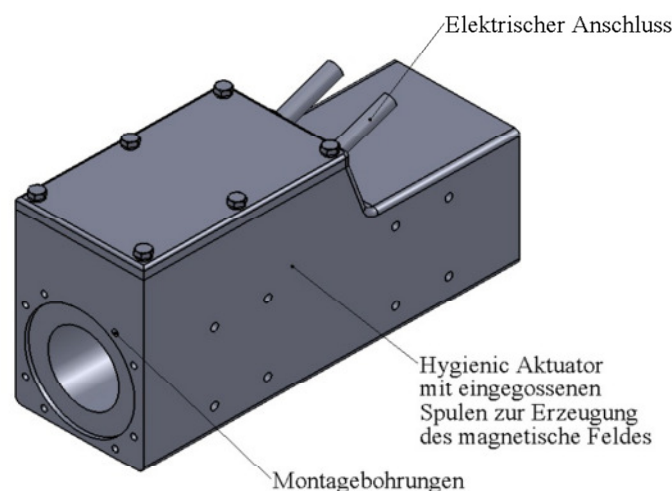


Abbildung 25 Cadmodel Hygienic Aktuator³⁷

³⁷ <http://www.dunkermotoren.com/default.asp?id=115&lang=2>

Auf Basis der Abbildung 25 und der oben geführten Diskussion erfolgt die Konstruktion einer Linearachse. Dabei sind die konstruktiven Hauptattribute wie folgt.

- elektrischer Antrieb
- magnetische Übertragung
- Gleitführung
- Dichtung
- Intervallschmierung

Die Gleitführung ermöglicht ein Festlager bei gewünschter linearer Bewegung, wodurch das anfangs dargestellte Problem mit den Querkräften gelöst wird. Weiterhin spricht für diese Gleitführung, dass dieses Prinzip bereits in einer anderen Baugruppe der DCSV 5000 erfolgreich zur Kompensierung von Querkräften eingesetzt wird. Die Dichtung erfolgt durch einen O-Ring, der allerdings zwischen Gleitlager und Hygienic Aktuator montiert wird. Der Schmiernippel ermöglicht ein regelmäßiges Nachschmieren. Die dargestellte Gabel in Abbildung 6 kann voraussichtlich verwendet werden und starr z.B. durch Verschweißen mit dem Hygienic Aktuator und einer Stützrippe verbunden werden.

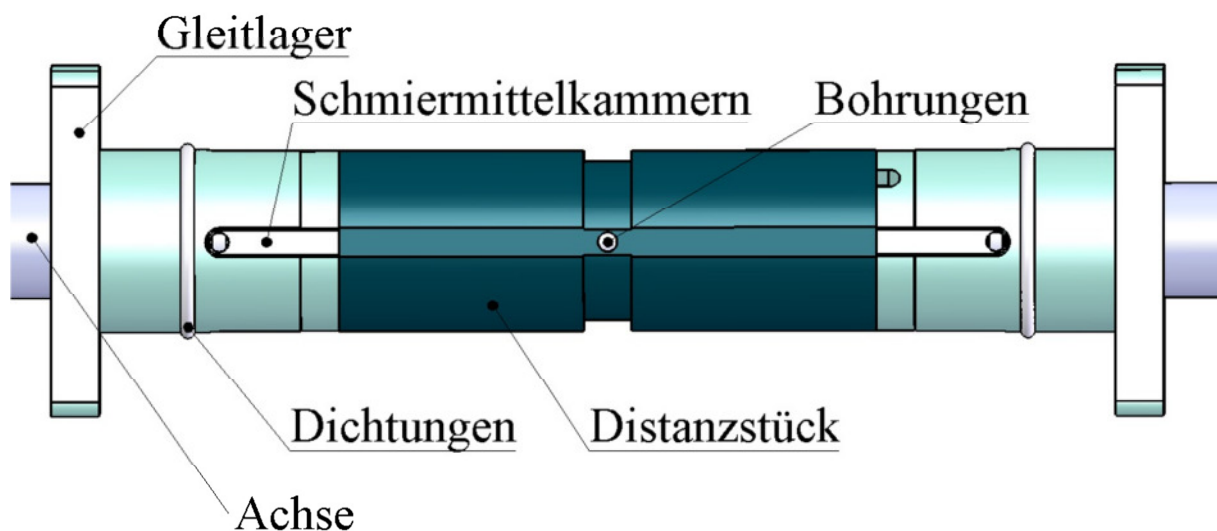


Abbildung 26 Schmiermittelkammern

In Abbildung 26 sind die Gleitlager und Kanäle zur Schmierstoffverteilung dargestellt. Die Gleitlager sind passend, jedoch axial beweglich auf der Achse montiert. Die Bohrungen ermöglichen dem Schmierstoff an die Achse zu gelangen. Die Dichtungen verhindern das Austreten des Schmierstoffs. Der Rezess ermöglicht das Montieren des Hygienic Aktuators an seinen Stirnflächen. Zwischen Gleitlageraußendurchmesser und dem Innendurchmesser des Hygienic Aktuators sind 2mm Unterschied, um die Wärmeausdehnung zu kompensieren. Abbildung 27 zeigt den eingebauten Zustand des Hygienic Aktuators in der Seitenansicht (links) und einer isometrischen Ansicht (rechts). Die Zentrierung auf der Achse erfolgt über die bereits oben genannten Rezesse, an denen mittels Senkschrauben der Hygienic Aktuator montiert wird. Zwischen dem Rezess und dem Hygienic Aktuator wird bei der Montage Silikon auf den Kontaktflächen aufgetragen. Dadurch wird ein möglicher Wassereintritt zusätzlich verhindert.

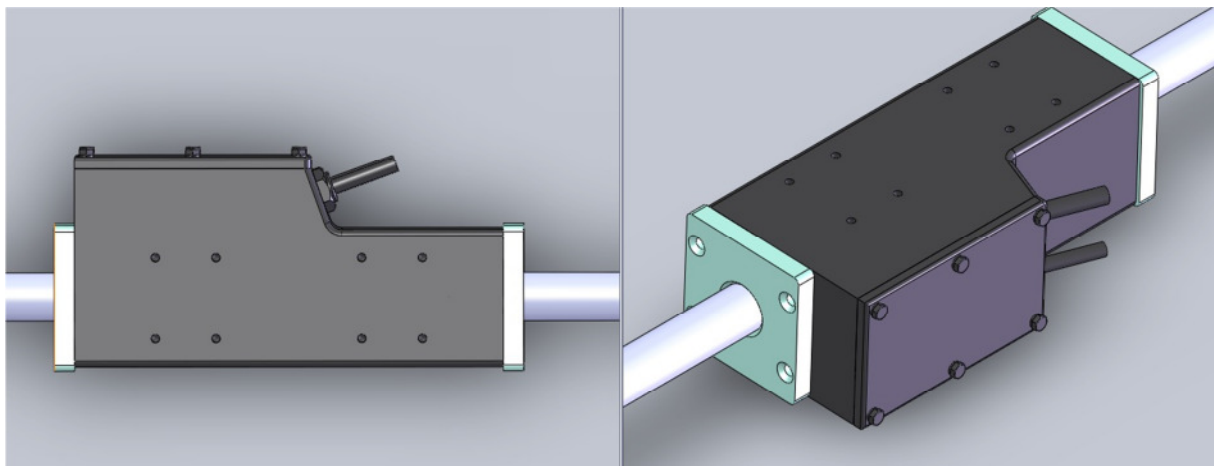


Abbildung 27 weitere Ausarbeitung

In Abbildung 28 ist die weitere Ausarbeitung dargestellt. Hinzu gekommen sind die Lagerböcke, um die Achse in der Maschine DCSV 5000 montieren zu können. Die Lagerböcke sind um 180° versetzt angeordnet. Hinzugekommen ist die Gabel zur Übertragung der linearen Bewegung auf das variable Rafferpaar. Die Gabel ist dabei mit der Befestigungsplatte und den Stützrippen verschweißt. Die Befestigungsplatte wird an dem Hygienic Aktuator montiert. Die Stützrippen stabilisieren die Gabel und leiten die Kräfte an die Gleitlager. Zusätzlich ist ein Schmiernippel montiert worden, um das Nachschmieren der Gleitlager zu ermöglichen. Außer dem Schmiernippel ist auch noch eine Austrittsbohrung (Abbildung 29) zu erkennen, die beim Füllen der Schmiermittelkammern die Luft entweichen lässt. Während des Betriebes ist die Austrittsbohrung durch eine Schraube verschlossen. Die Abbildung 29 verdeutlicht das gesamte System und zeigt die Schmierstoffkammern, die Positionen der Dichtungen und die Gleitlagerungen auf der Achse. Das Distanzstück ist spielend eingebaut, damit sich das Schmiermittel zwischen Distanzstück und Achse verteilen kann.

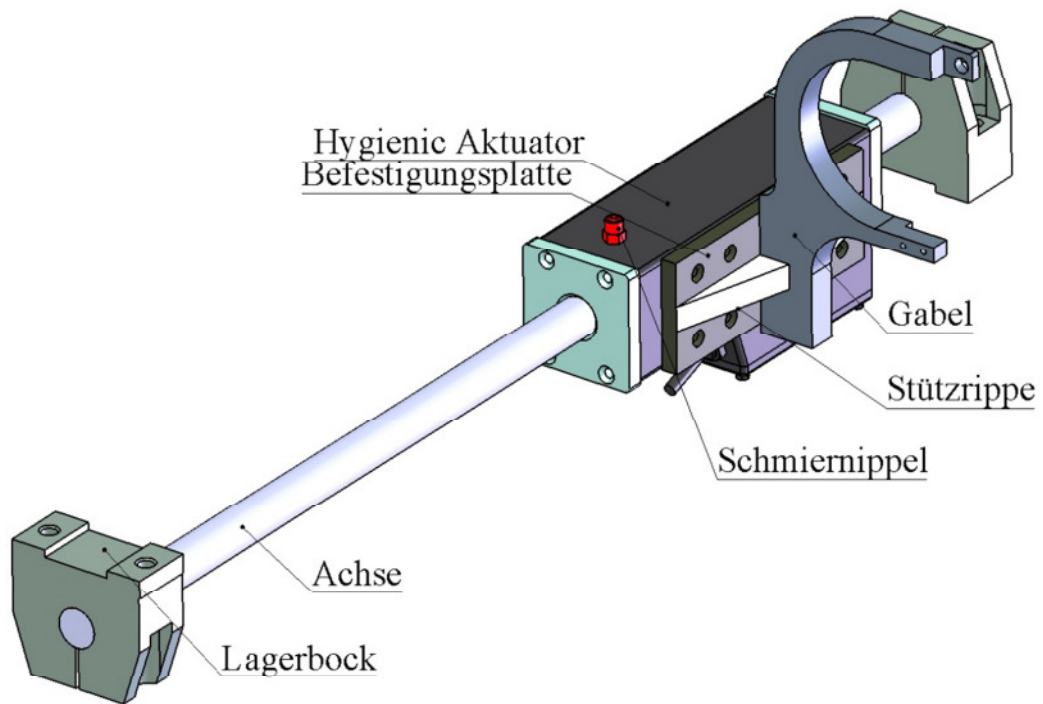


Abbildung 28 Magnetische Linearachse

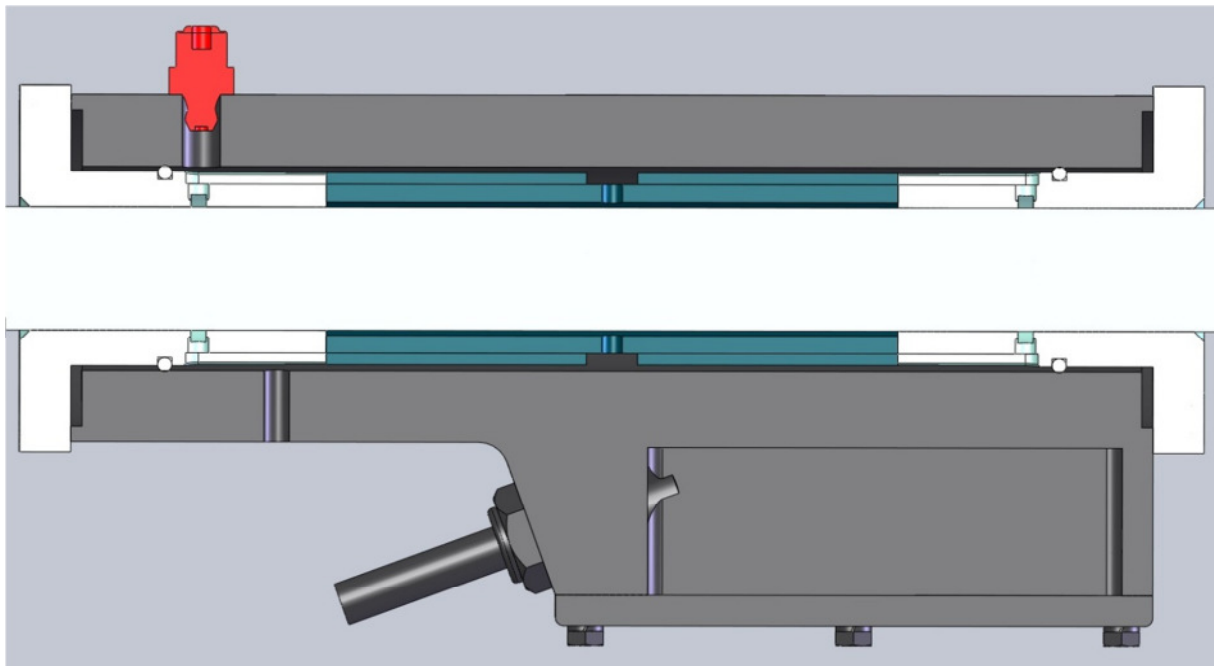


Abbildung 29 Querschnittansicht

Durch die Vervollständigung der FMEA (Tabelle 7) in Tabelle 14 ist zu erkennen, dass sich die RPZ erheblich verringert hat. Durch die Verwendung der O-Ringe bei der magnetischen Linearachse wird die Dichtung statisch und geschützt gegen äußere Einwirkungen verbaut. Durch das magnetische Feld, das den Zahnriemen als Übertragungsglied ersetzt, kann das Risiko des Funktionsausfalls erheblich verringert werden. Eine Längenänderung des Übertragungsgliedes ist bei der magnetischen Linearachse nicht möglich. Durch die Gleitlagerung der magnetischen Linearachse können Querkräfte, die durch Parallelitätsfehler entstehen, besser kompensiert werden, als mit der Kugelschienenführung. Der Grund dafür ist, dass ein Gleitlager wesentlich robuster ist, als eine Kugelschienenführung. Der derzeitige Antrieb ist ein Servomotor. Dieser erzeugt mittels Spulen ein Magnetfeld, das dann den Rotor des Motors in eine Drehbewegung versetzt. Im Prinzip funktioniert die magnetische Linearachse genauso. Das Resultat ist allerdings keine Dreh-, sondern eine Linearbewegung. Das ist ein erheblicher Vorteil, weil keine Übertragung der Drehbewegung in eine Linearbewegung erfolgen muss. Die Schmiermittelnuten in Kombination mit den O-Ringen bilden einen optimalen Schmiermittelspeicher. Durch die Nuten und Bohrungen gelangt das Schmiermittel an die zu schmierenden Stellen und verringert somit deutlich die Reibung. Im Gesamten betrachtet hat die magnetische Linearachse eine technische Verbesserung von 9% (vgl. Tabelle 13 Hygienic Aktuator mit Linearachse MLEKC).

Tabelle 14 FMEA

Linearachse MLEKC									Magnetische Linearachse				
Funktion	mögliche Fehler			derzeitiger Zustand					verbesserter Zustand				
	Fehler- beschreibung	Folgen	Ursache	Kon- trolle	A	B	C	R P Z	Korrektur	A	B	C	R P Z
Dicht- ung	Riss im Feder- stahl- blech	Austritt von Schmier- mittel	Einwirkung von außen	keine	8	8	10	640	O-Ringe	4	6	4	96
Über- tragung	Längen- änderung Zahn- riemen	Funktions- ausfall	Auslegungs- fehler	keine	4	8	10	320	Magnet- feld	3	3	3	27
Führung	Beschädi- gung der Kugel- schienen- führung	Funktions- ausfall	Parallelitäts- fehler Verschleiß der Gleitlager- ung	keine	2	8	7	112	Gleitlager	4	4	4	64
Antrieb	Ausfall der Motor- funktion	Funktions- ausfall	Überlast	keine	8	8	4	256	elektrisch direkt	4	4	4	64
Schmier- ung	Schmier- mittel austritt	erhöhte Reibung	beschädigte Dichtung	keine	8	8	8	512	Schmier- nuten	2	2	2	16

Nach der Konstruktion der Abbildung 28 erfolgt nun der Einbau in die Maschine DCSV 5000. In Abbildung 30 ist mit der blau hinterlegten Farbe die Linearachse MLEKC und der zugehörige Servomotor in der Vorderansicht (links) und der Seitenansicht (rechts) gekennzeichnet. Diese Baugruppe wird entfernt, um diesen Platz für die Konstruktion für Abbildung 28 zur Verfügung zu haben. Dies ist in Abbildung 31 dargestellt. In Abbildung 32 ist links die Vorderansicht und rechts die Seitenansicht von links dargestellt. Im Vergleich von Abbildung 30 und Abbildung 32 ist deutlich die enorme Platzeinsparung zu erkennen. Die magnetische Linearachse ist allerdings länger als die Linearachse MLEKC. Zusätzlich ist zu erkennen, dass keine großen Umbauten für den Einbau der magnetischen Linearachse erforderlich sind. Lediglich eine Versetzung des rechten Lagers und Bohrungen in den vorhandenen Träger für die Montage des linken Lagers müssen durchgeführt werden. Dargestellt ist somit, dass der Einbau der magnetischen Linearachse bei geringen konstruktiven Änderungen an der Maschine DCSV 5000 möglich ist.

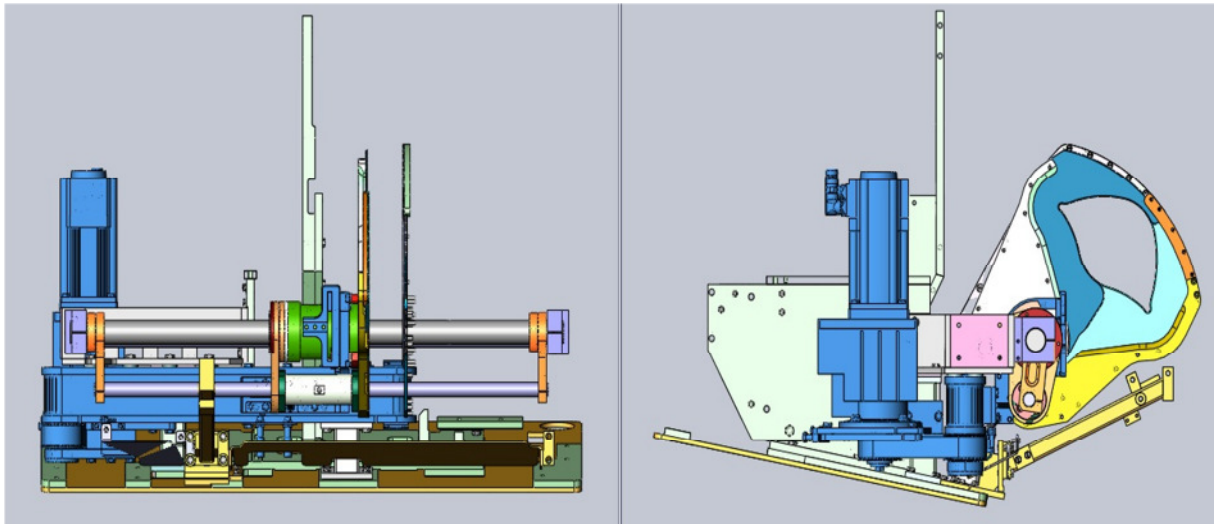


Abbildung 30 Baugruppe Spreizvorrichtung

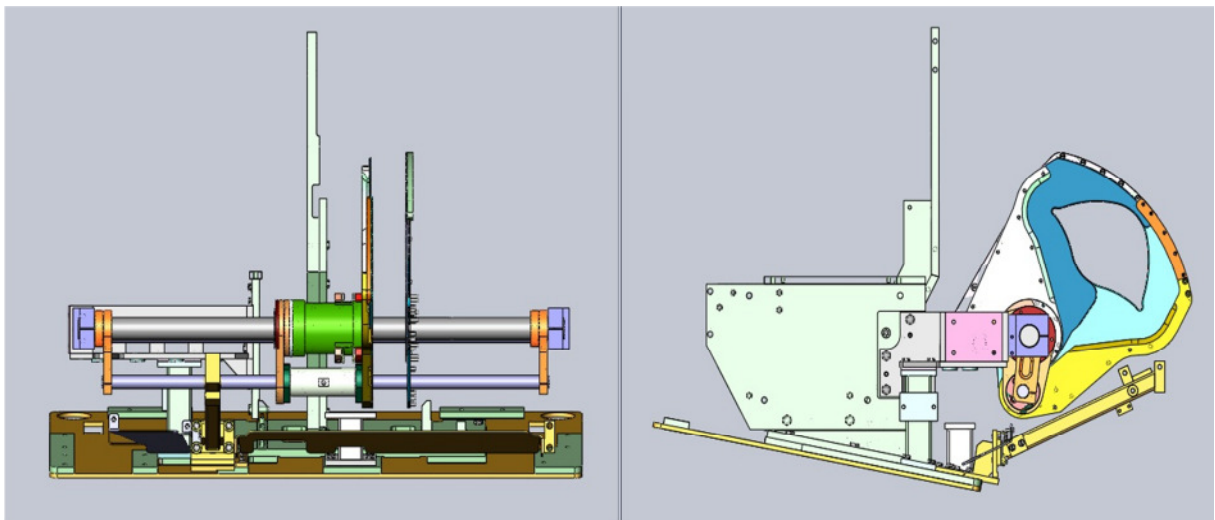


Abbildung 31 DCSV 5000 ohne Baugruppe Spreizvorrichtung

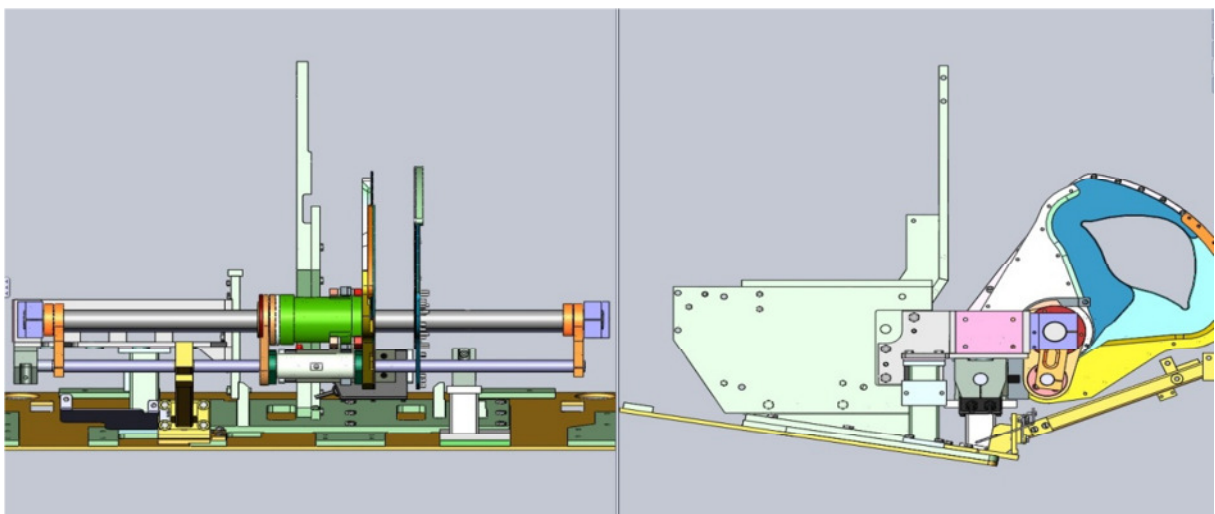


Abbildung 32 Eingebaute magnetische Linearachse

4 Zusammenfassung

Die magnetische Linearachse überzeugt durch die robustere Führung mit einem geeigneten Schmierungssystem und optimaler Abdichtung. Die Dichtung ist so gut verbaut, dass äußere Einflüsse auf diese unmöglich sind und dadurch die Störanfälligkeit erheblich reduziert wird. Zusätzlich sind die in Harz eingegossenen Spulen gegen den Kontakt mit Wasser geschützt. Die Seltenerd-magnete, die in der Stange verbaut sind, sind ebenfalls gegen den Kontakt mit Wasser geschützt. Das ganze System ist korrosionsbeständig und auf Grund der glatten Oberfläche des Edelstahls gut zu reinigen. Dies macht das System auf der hygienischen Seite gut vertretbar für den Einsatz in Lebensmittelmaschinen.

Steuerungstechnisch kann der Hygienic Aktuator wie bereits beschrieben mit einem Inkrementalencoder und digitale Hallsignalen angesteuert werden. Das ermöglicht eine problemlose Integration in die Maschine DCSV 5000.

Durch den Luftspalt zwischen Hygienic Aktuator und den Gleitlagern kann sich das System in Folge von Wärme, die durch die Erzeugung des Magnetfeldes entsteht, ausdehnen. Ein Klemmen der Lager wird dadurch verhindert.

Das Kabel für den elektrischen Anschluss bewegt sich mit jeder linearen Bewegung des Hygienic Aktuators mit. Dadurch ist die Belastung auf das Kabel sehr hoch. Dimensioniert man die Kabellänge so, dass dieses genügend Flexibilität hat, kann diese Belastung kompensiert werden. Es ist bei der Montage darauf zu achten, dass das Kabel nicht an anderen Maschinenteilen reibt. Schleppketten können aus hygienischen Gründen nicht verwendet werden.

Als Gleitlagerwerkstoff wird Ampco 18³⁸ verwendet. Dieser Werkstoff ist eine Legierung, die aus Eisen, Kupfer und Aluminium besteht. Er ist verschleißfest und hat dazu gute Gleiteigenschaften. Zusätzlich ist dieser Werkstoff druckfest, wodurch das Verformungsrisiko minimiert wird. Dieser Werkstoff wird bereits an anderer Stelle der Maschine erfolgreich verwendet. Das spricht für den Einsatz von Ampco 18.

Der Schmiernippel und die Bohrung für den Fettaustritt können an beliebiger Position angebracht werden. Im Detail ist darauf zu achten, dass beim Bohren die Spulen nicht beschädigt werden. Die Zugänglichkeit des Schmiernippels muss natürlich gegeben sein. Daher ist bei der weiteren Detaillierung darauf zu achten, dass der Schmiernippel nicht durch andere Bauteile blockiert wird.

Dies sind die Vorteile, die den Einsatz der magnetischen Linearachse begründen.

³⁸ <http://www.kollmann-metalle.at/new/download/AAdt/A1823GGZdt.pdf>

An zukünftigen Aufgaben sind die elektromagnetischen Emissionen zu analysieren. Zum einen ist zu klären, ob Werte in Bezug auf den Arbeitsschutz überschritten werden. Desweiteren ist zu analysieren, ob die Emissionen negative Einflüsse auf das Produkt haben.

Ein weiterer Punkt, der noch diskutiert werden muss, ist die Kontaktstelle zwischen Kabel und Hygienic Aktuator. Die Kontaktstelle ist nur nach IP 65 abgedichtet, dies könnte beim Einsatz eines Hochdruckreinigers zu Problemen führen. Kompensieren könnte man das, indem der Kontakt mit Spritzsilikon zusätzlich geschützt wird.

Optional können noch Verbesserungen an dem Konzept vorgenommen werden. Zum einen kann die Quaderform des Hygienic Aktuators zum Beispiel rund sein. Dies würde die Reinigung erleichtern, weil keine Kanten oder Absätze die Produktreste daran hindern können mit dem Wasser fortgespült zu werden. An der Quaderform können diverse Kanten abgerundet werden. Dies hat ebenfalls den Vorteil der besseren Reinigung.

Im Gesamten betrachtet überwiegen die Vorteile die zukünftigen Aufgaben, die evtl. noch zu einem Nachteil werden können. Deshalb ist die magnetische Linearachse eine Ersatzmöglichkeit für die Linearachse MLEKC. Anhand der FMEA und der Bewertungsmatrix ist eine Verbesserung durch den Einsatz der magnetischen Linearachse begründet. Diese Ausarbeitung ist die Grundlage, die magnetische Linearachse weiter zu dimensionieren und den weiteren Konstruktionsprozess durchzuführen. Abschließend sei noch gesagt, dass die nicht ausgearbeiteten Konzepte auch als Anregung zum Weiterdenken genutzt werden können. Möglicherweise ergeben sich durch Verbesserung des technischen Standards geeignetere Konzepte.

Aus betrieblicher Sicht ist es mit diesem Konzept möglich, die DCSV 5000 wieder am Markt anzubieten. Die Tipper Tie technopack GmbH muss dazu die nächsten konstruktiven und auch vertrieblichen Schritte einleiten. Aus konstruktiver Sicht sind die Fertigungszeichnungen für einen Prototyp zu erstellen. Am Prototyp ist zu überprüfen, ob sich Theorie und Praxis gleichen. Ob es wirklich zu einer Umsetzung des ausgearbeiteten Konzeptes kommt, war bis zur Abgabe der Thesis unklar.

Quellenverzeichnis

^{1 2 3 4 5 6 7 8 21} zur freien Verfügung von der Tipper Tie technopack GmbH

^{9 10} <http://www.strasser-gmbh.com/katalog/cleanmotion-broschuere>

^{11 16 17 18 36} Conrad, Peter : Schiemann, Hubert : G.Vömel, Paul : Erfolg durch methodisches Konstruieren . 1. Grafenau/Württ. : Lexika-Verlag : 1977

^{12 15} <http://home.intergga.ch/neo/downloads/fmea.pdf>

^{13 14} <http://www.meistersite.de/pdfs/methodenkoffer/FMEA.pdf>

¹⁹ Muhs, Dieter : Wittel, Herbert : Jannasch, Dieter : Voßiek, Joachim : Roloff/Matek Maschinenelemente . 18. Wiesbaden : Vieweg Verlag : 2007

²⁰ http://galaxy.weidmueller.com/configurator/pdfs/hdc/Schutzarten_DE.pdf

^{22 24} http://www.nk-gmbh.de/NK_GmbH/5/Riemen/5_1.php?key=10

²³ Produktkatalog Lenze Drive Systems GmbH G-motion MC05/2007

²⁵ http://img.directindustry.de/images_di/photo-g/kugelgewindetrieb-28821.jpg

^{26 27} http://linearachsen.schlueter-automation.de/Kataloge/ISWA_IP65_deu.pdf

^{28 29} http://www.dunkermotoren.de/data/linearsysteme/downloads/DS01102_DE.pdf

³⁰ <http://www.pneumatikwelt.de/Kap7Atlas7.pdf>

²¹ http://img.directindustry.de/images_di/photo-g/standard-pneumatischer-zylinder-120959.jpg

³² http://www.gates.com/Germany/brochure.cfm?brochure=9755&location_id=13935

³³ <http://walther-flender-gruppe.de/de/produkte/zahnriemenantriebe/polychain-zahnriemen/zahnriemen-polychain-gt-carbon/>

³⁴ <http://www.murtefeldt.de/produkte/werkstoffe/technische-werkstoffe-1/original-werkstoff-s/>

³⁵ <http://shop.haberkorn.com/repository/itempopup/0000FF41.jpg>

³⁷ <http://www.dunkermotoren.com/default.asp?id=115&lang=2>

³⁸ <http://www.kollmann-metalle.at/new/download/AAdt/A1823GGZdt.pdf>



Formblatt **Erklärung zur selbständigen Bearbeitung einer ausgeführten Bachelorthesis**

Zur Erläuterung des Zwecks dieses Blattes:

§ 16 Abs. 5 der APSO-TI-BM lautet:

„Zusammen mit der Thesis ist eine schriftliche Erklärung abzugeben, aus der hervorgeht, dass die Arbeit – bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit (§18 Absatz 1) – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Dieses Blatt mit der folgenden Erklärung ist nach Fertigstellung der Arbeit durch jede/n Kandidat/en/in auszufüllen und jeweils mit **Originalunterschrift** (keine Ablichtungen!) **als letztes Blatt des als Prüfungsexemplar der Bachelorthesis gekennzeichneten Exemplars einzubinden.**

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann - auch nachträglich - zur Ungültigkeit des Bachelor-Abschlusses führen.

Erklärung

Hiermit versichere ich,

Name: _____ Vorname: _____

dass ich die vorliegende Bachelorthesis bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit mit dem Thema

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

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der Bachelorthesis ist erfolgt durch

Ort

Datum

Unterschrift im Original