



Bachelor of Science Andreas Christian Rudl

CAD-basierte Schnittstellenentwicklung für eine vereinfachte Montage eines mechatronischen Antriebes

Diplomarbeit

zur Erlangung des Akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Technische Universität Graz

Studienrichtung Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau

Institut für Fahrzeugtechnik

Member of Frank Stronach Institute

Institutsvorstand: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Fischer

Betreuer: Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Mario Hirz

Graz, im November 2017

In Kooperation mit:

LOGICDATA, Electronic & Software Entwicklungs GmbH



Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material that has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

(date)

.....

(signature)

Kurzfassung

In dieser Diplomarbeit werden Konzepte zur Anbindung eines mechatronischen Antriebes in eine Tischsäule ausgearbeitet. Dies geschieht unter der Anwendung geeigneter Konstruktionsrichtlinien als methodische Vorgehensweise sowie einer CAD-basierten Konstruktion. Das Ziel der Arbeit ist eine einfachere Montage hinsichtlich Automatisierung für die Kunden, wobei die Variantenvielfalt für das Unternehmen LOGICDATA so gering wie möglich zu halten ist. Am Rande wird auf die Fixierung, sprich Transportsicherung, gegen ein selbsttätiges Verdrehen der Stahlspindel des Antriebes eingegangen und die Anbindung des Mittenrohrs zur Synchronverstellung des mittleren Säulenrohrs erwähnt. Bei Auslieferung des Antriebes wird die Spindel auf eine bestimmte Länge für den Einbau in die Säule nach Vorgabe von LOGICDATA eingestellt. Die Problematik ist hierbei, dass es sich um ein nicht selbsthemmendes Bewegungsgewinde handelt, weshalb es zu einem selbsttätigen Verdrehen der Spindel während des Transportes oder der Montage kommen kann. Konzepte der Stahlspindelanbindung werden durch Auswahl- und Analyseverfahren für weitere Detaillierungsphasen hin zur Prototypenfertigungen ausgewählt. Diese Prototypen werden hinsichtlich einer einfacheren Säulenmontage getestet und mit dem bestehenden System verglichen. Zudem werden Tests für die Kraft- und Momentübertragung an den Prototypen durchgeführt.

Abstract

In this diploma thesis, concepts for connecting a mechatronic drive into a table column are developed. This is done by applying appropriate design guidelines as a methodical approach as well as CAD-based design. The aim of the work is to simplify the assembly process for customers using automated systems while the variety of variants for the company LOGICDATA has to be kept as low as possible. Moreover, fixing of the spindle against self-rotation of the drive is considered, as well as the connection of the middle pipe for a synchronous height adjustment of the column. By delivering the drive to the customer, the spindle has to be set to a certain length for installation in the column as specified by LOGICDATA. One challenge represents a non-self-locking movement thread, which might lead to self-rotation of the steel spindle during transportation or assembly. Concepts of the spindle interface are selected by analysis procedures for further detailing phases to prototype production. These prototypes are tested for a simpler assembly into the column and compared with the current system. In addition, tests are carried out on the prototypes to withstand the required specification of force and torque.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die mich während meines Studiums unterstützt haben, und jenen, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben.

Zuerst gebührt mein Dank Herrn Dipl.-Ing. Rupert Rohrmoser von der Firma LOGICDATA, der mir die Arbeit in dieser Form ermöglicht, mich betreut und begutachtet hat. Für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bedanken.

Ich danke Herrn Associate Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Mario Hirz der Technischen Universität Graz für seine uneingeschränkte Informationsbereitschaft trotz vieler Änderungen des Arbeitsumfanges im Laufe der Zeit sowie das Verständnis für die Unterbrechung durch mein Auslandssemester.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben, und für den starken emotionalen Rückhalt über die Dauer meiner gesamten Ausbildung.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Arbeitskollegen bei LOGICDATA, im Speziellen bei Herrn Ing. Hannes Puck und Herrn Ing. Thomas Windisch bedanken, die mir mit viel Hilfsbereitschaft zur Seite standen.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung.....	I
Statutory Declaration.....	II
Kurzfassung.....	III
Abstract.....	IV
Danksagung.....	V
Inhaltsverzeichnis.....	VI
Abkürzungen.....	X
Formelzeichen.....	XI
1 Einleitung.....	1-1
1.1 Ausgangssituation.....	1-1
1.1.1 LOGICDATA Produkte.....	1-2
1.1.1.1 SLIMdrive-500.....	1-3
1.1.1.2 SLIMdrive-660s und LOGICdrive-660.....	1-4
1.1.1.3 Antriebe im Einbauzustand.....	1-4
1.1.2 Anschlüsse.....	1-6
1.1.2.1 Stahlspindelanschluss.....	1-6
1.1.2.2 Stahlspindeleinstellung.....	1-7
1.1.2.3 Mittenrohreinstellung.....	1-8
1.2 Problemstellung und Lösungsansatz.....	1-8
1.2.1 Anforderung.....	1-10
1.2.2 Vorgehensweise.....	1-11
2 Methodische Vorgehensweise.....	2-13
2.1 Entwicklungsmethodik in der Mechatronik.....	2-13
2.1.1 Mikro-Logik als Problemlösungszyklus.....	2-13
2.1.1.1 Zielsuche.....	2-14
2.1.1.2 Lösungssuche.....	2-15
2.1.1.3 Auswahl.....	2-15
2.1.2 Das V-Modell als Makrozyklus.....	2-18
2.1.3 Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien.....	2-20
2.2 Vorgehen des Systems Engineering.....	2-23
2.2.1 Vom Groben zum Detail.....	2-23
2.2.2 Stufenweise Variantenbildung.....	2-24
2.3 Nutzwertanalyse.....	2-24

3	Theoretische und technische Grundlagen	3-26
3.1	Theorie zu Bewegungsschrauben.....	3-26
3.1.1	Kräfteituation	3-26
3.1.2	Gewindekenngrößen und Kräfteituation an Bewegungsgewinden	3-27
3.2	Grundlagen zu den Systemen.....	3-30
3.2.1	Inline-Antriebslayout	3-30
3.2.2	Single-stage und dual-stage Antriebseinheiten.....	3-31
3.2.3	Thick-End-Down und Thick-End-Up Design.....	3-32
3.3	Anforderungen an Drop&Drive.....	3-33
3.3.1	Stahlspindelanbindung.....	3-33
3.3.1.1	Inkrementelle Verstellung.....	3-34
3.3.1.2	Bauraumanforderungen.....	3-34
3.3.2	Transportsicherung.....	3-35
3.3.3	Mittenrohranbindung	3-35
3.3.4	Motoranbindung.....	3-36
3.4	Test- und Versuchsanforderungen	3-37
3.4.1	Test als Einzelsystem.....	3-37
3.4.1.1	Testscenario der Stahlspindel.....	3-37
3.4.1.2	Testscenario der Transportsicherung.....	3-37
3.4.1.3	Testscenario als Säuleneinheit nach LOGICDATA Spezifikation.....	3-37
3.4.2	Test als Gesamtsystem.....	3-38
3.4.2.1	Testscenario nach US-Norm (ANSI/BIFMA X5.5-2014)	3-38
3.4.2.2	Testscenario nach EN 527-3	3-39
4	Ist-Analyse zum Stand der Technik.....	4-41
4.1	Systeme am Markt.....	4-41
4.1.1	Benchmarkanalyse.....	4-41
4.1.1.1	System mit LOGICDATA Antrieb ohne Adapter	4-41
4.1.1.2	System mit LOGICDATA Antrieb mit Adapter	4-42
4.1.1.3	Systeme ohne LOGICDATA Antriebe.....	4-44
4.2	Bewertung der Ist-Situation.....	4-46
4.2.1	Stahlspindelanbindung.....	4-46
4.2.2	Transportsicherung.....	4-46
4.2.3	Andere Schnittstellen.....	4-47
4.2.3.1	Mittenrohranbindung beim Thick-End-Down Design	4-47
4.2.3.2	Motoranbindung.....	4-49

4.2.3.3	Assemblierungsprozess	4-50
5	Konzepterstellung	5-52
5.1	Konzeptausarbeitung	5-52
5.1.1	Anbindung Stahlspindel	5-52
5.1.1.1	Konzept 5 mit Selbstschneideschraube	5-52
5.1.1.2	Konzept 5.1 Sechskant mit Selbstschneideschraube	5-53
5.1.1.3	Konzept 13 Kegelerbindung	5-54
5.1.1.4	Konzept 16 Keilklemmung	5-56
5.1.1.5	Konzept 17 Klippscheibe	5-57
5.1.1.6	Konzept 18 Verprägung	5-58
5.1.2	Transportsicherung	5-58
5.1.3	Mittenrohranbindung	5-59
5.2	Konzeptbewertung	5-61
5.2.1	Paarweiser Vergleich	5-61
5.2.2	Nutzwertanalyse	5-63
5.3	Konzeptauswahl	5-64
5.4	Konzeptphasen	5-64
5.5	FMEA	5-65
5.6	Betrachtung der Umsetzbarkeit für die Serienanwendung	5-66
5.6.1	Umsetzbarkeit der Stahlspindelkonzepte	5-66
5.6.2	Umsetzbarkeit der Mittenrohranbindung	5-67
5.6.3	Umsetzbarkeit der Transportsicherung	5-67
5.7	Adaptierbarkeit für Stahlspindelssysteme	5-67
6	Prototypen und empirische Versuche	6-69
6.1	Fertigung von Prototypen	6-69
6.1.1	Phase 1	6-69
6.1.2	Phase 2	6-70
6.2	Einbauprozess	6-72
6.2.1	Bauteilanpassung für die Versuchsdurchführung	6-72
6.2.2	Assemblierung von Konzeptprototypen der zweiten Generation	6-73
6.3	Tests	6-74
6.3.1	Testaufbau	6-74
6.3.1.1	Zugkraftermittlung	6-74
6.3.1.2	Drehmomentermittlung	6-75
6.3.2	Versuchsergebnisse mit erster Prototypengeneration	6-76

6.3.3	Versuchsergebnisse mit zweiter Prototypengeneration.....	6-78
7	Schlussbetrachtung	7-81
	Abbildungsverzeichnis.....	85
	Tabellenverzeichnis.....	88
	Anhangverzeichnis	89

Abkürzungen

CAD	Computer Aided Design
CNC	Computerized Numerical Control
EN	Europäische Norm
EOL	End-of-Line
EU	Europäische Union
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
KO	Knockout
LD	LOGICDATA
PCB	Printed Circuit Board
PT1	Prototypengeneration 1
PT2	Prototypengeneration 2
TED	Thick-End-Down
TEU	Thick-End-Up
US	United States
VDC	Volts Direct Current
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional

Formelzeichen

Lateinische Zeichen

e	Einrastpunkte	-
d_2	Flankendurchmesser	mm
d_m	Mittlerer Gewindedurchmesser	mm
F	Allgemeine Kraft	N
F_H	Hubkraft	N
F_L	Last	N
F_N	Normalkraft	N
F_S	Längskraft	N
F_R	Reibkraft	N
F_{res}	Resultierende Kraft	N
F_U	Umfangskraft	N
G	Kraft	N
g	Erdbeschleunigung	m/s^2
h	Fallhöhe	mm
L	Länge	mm
M	Drehmoment	Nm
m	Masse; Eigenmasse Tisch	kg
n	Gangzahl Gewinde	-
P	Teilung Gewinde	mm
P_H	Gewindesteigung	mm
W	Arbeit	J
z	Höhe	mm

Griechische Zeichen

α	Flankenwinkel	°
β	Teilungswinkel	°
δ	Virtuelle Größe	-
μ	Reibkoeffizient	-
ϱ	Reibwinkel	°
ϱ_0	Reibwinkel Haftreibung	°
φ	Drehwinkel; Winkel	rad; °

1 Einleitung

LOGICDATA GmbH ist Innovationsführer und internationale Größe im Bereich microcontrollerbasierter Motorsteuerungen und Bedienelemente für ergonomische Lösungen in der Möbelbranche. Die Kompetenz liegt in der Entwicklung intelligenter Elektronik- und Mechatroniksysteme sowie anspruchsvoller Embedded Software. Die Geschäftssparten sind in Office und Home unterteilt. Office umfasst Produkte höhenverstellbarer Tischsysteme, wogegen sich die Sparte Home mit verstellbaren Bettsystemen beschäftigt.

1.1 Ausgangssituation

Für die elektrische Verstellung von Bürotischen in der Sparte Office werden Antriebseinheiten, bestehend aus Motor, Getriebe und Spindelsystem sowie Steuerung und Handschalter, bei LOGICDATA entwickelt (Systemkontext siehe Abbildung 1-1).

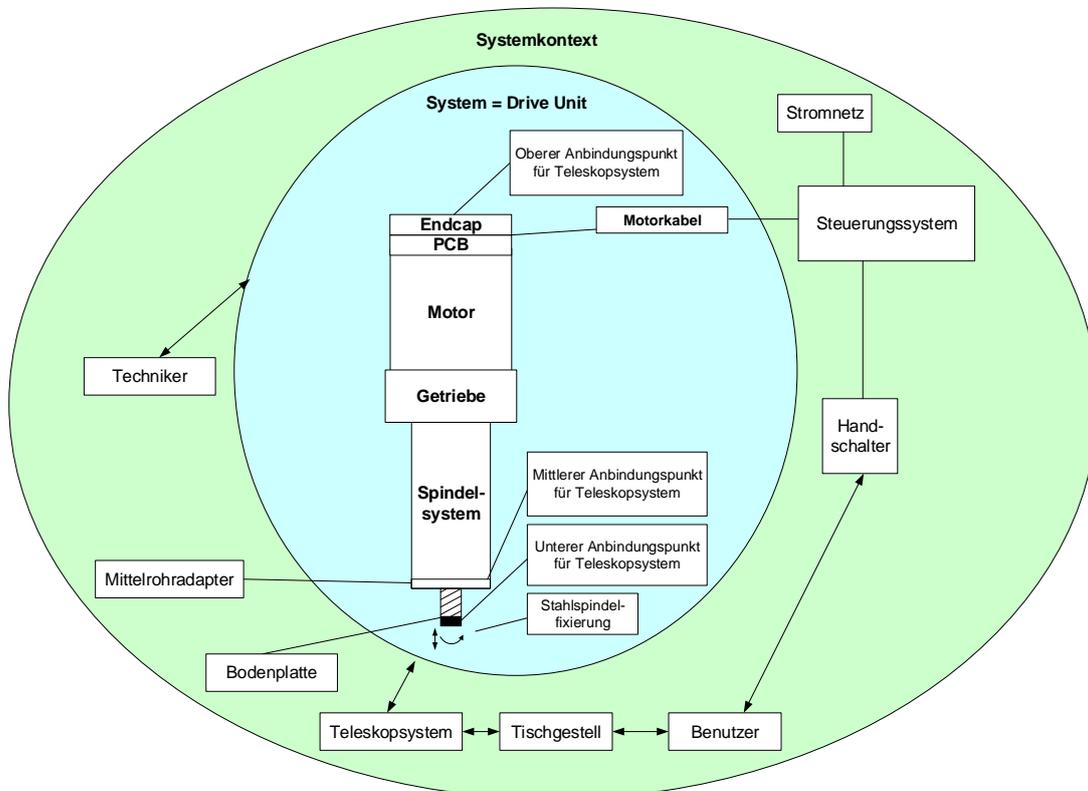


Abbildung 1-1: Systemkontext zur Antriebseinheit

1.1.1 LOGICDATA Produkte

Die folgenden Abbildungen zeigen jeweils eine Steuerungseinheit (Abbildung 1-2) sowie einen Handschalter (Abbildung 1-3).



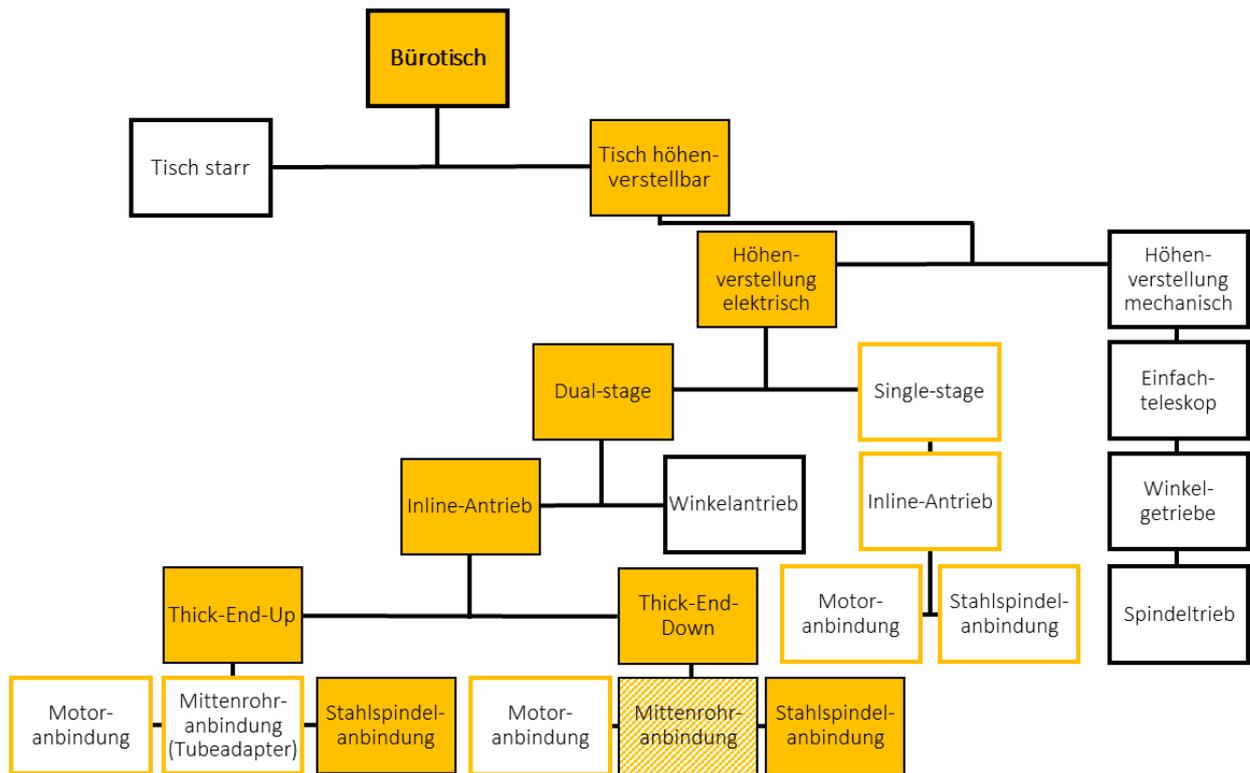
Abbildung 1-2: Control-Box SMARTeco+



Abbildung 1-3: Handset TOUCHdown

Betrachtet man die Säule, die den Tisch führt und in welcher der Antrieb befestigt ist, so gibt es grundsätzlich zwei Hauptunterscheidungsmerkmale im Design. Zum einen eine so genannte „Thick-End-Down“ (TED) und zum anderen eine „Thick-End-Up“ (TEU) Variante. Außerdem werden die Säulen in „single-stage“ und „dual-stage“ Bauweise unterteilt. Diese Begrifflichkeiten werden in 3.2 (Grundlagen zu den Systemen) erläutert. Per Definition wird als Antrieb Motor, Getriebe und das Spindelsystem zusammengefasst.

Die Kennzeichnung in Abbildung 1-4 zeigt das Geschäftsfeld der Office-Antriebe sowie den für diese Diplomarbeit relevanten Bereich.



Legende:



Geschäftsfeld von Logicdata und Betrachtung in dieser Diplomarbeit



Geschäftsfeld von Logicdata und teilweise Betrachtung in dieser Diplomarbeit



Geschäftsfeld von Logicdata



Außerhalb des Geschäftsfeldes von Logicdata

Abbildung 1-4: Systemabgrenzung

1.1.1.1 SLIMdrive-500

Derzeit befinden sich drei Antriebe im Portfolio der Firma LOGICDATA, wovon der in Abbildung 1-5 gezeigte SLIMdrive-500 die kostengünstigste Variante darstellt, welcher in single-stage Säulensystemen zum Einsatz kommt. Dieser Antrieb kann einen Maximalhub von 500 mm erzeugen und ist aufgrund des single-stage Systems in der Mindesteinbauhöhe länger als jener in dual-stage Bauweise. Für den SLIMdrive-500 lassen sich Säulensysteme mit nur zwei Rohren aufgrund des geringeren Hubs verwenden. Die Besonderheit bei diesem Antriebssystem liegt in der Möglichkeit der zu Beginn erwähnten Designfreiheit, der Verwendung als TEU sowie TED Variante. Hier wird zum Überblick auf Abbildung 1-4 mit den jeweiligen Produktlinien hingewiesen.



Abbildung 1-5: Single-stage Antrieb SLIMdrive-500

1.1.1.2 SLIMdrive-660s und LOGICdrive-660

Im Gegensatz zu der single-stage Variante mit einem Zweirohr-Säulensystem wird für einen dual-stage Antrieb ein Dreirohr-Säulensystem benötigt. Diese Notwendigkeit liegt in der geforderten Mindesthöhe von Tischen und des geforderten Verstellhubes. Der Hub beträgt bei beiden dual-stage Antrieben 664 mm. Im Gegensatz zum single-stage System dreht sich die äußere Hohlspindel und schraubt die Stahlspindel, welche nicht rotiert, beim Einfahren in die Spindelmutter hinein, beziehungsweise beim Ausfahren aus der Spindelmutter heraus. Das bedeutet, dass zwei Spindeln des Linearantriebs entwickelt wurden, um das Mittelrohr synchron zu den beiden anderen Rohren auf und ab bewegen zu können (siehe Abbildung 1-6 und Abbildung 1-7).



Abbildung 1-6: Dual-stage Antrieb SLIMdrive-660s



Abbildung 1-7: Dual-stage Antrieb LOGICdrive-660

Der LOGICdrive-660 Antrieb unterscheidet sich gegenüber den bisherigen Antrieben SLIMdrive-500 und SLIMdrive-660s in der Integration der Steuerung in den Antrieb selbst, weshalb eine externe Steuerung nicht mehr benötigt wird.

1.1.1.3 Antriebe im Einbauzustand

In Abbildung 1-8 ist ein SLIMdrive-660s Antrieb in einer Kundensäule in der TED Bauweise in einer rechteckigen Säule verbaut.

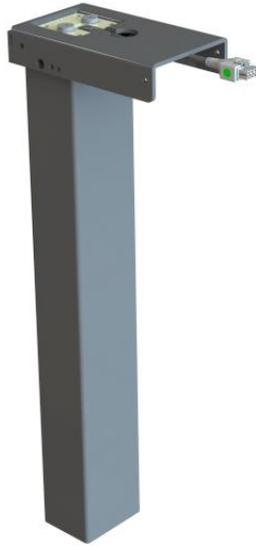


Abbildung 1-8: Säule mit Antrieb als Thick-End-Down Variante

Ein Prototyp eines Bürotisches mit jeweils einem verbauten dual-stage Antrieb pro Säule ist in Abbildung 1-9 in einer runden Säule ausgeführt. Je nach Kundenwunsch werden unterschiedliche Säulendesigns verwendet.

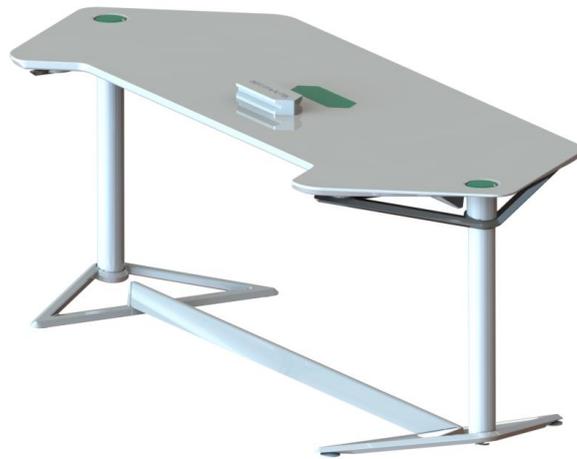


Abbildung 1-9: Prototyp eines höhenverstellbaren Bürotisches

Für die Auslegung von Antrieben sowie Antriebseinheiten müssen Spezifikationen, die in Tabelle 1-1 gezeigt sind, berücksichtigt werden. Diese Spezifikationen gelten ebenso für die Schnittstellen der Anbindungen des Antriebes in der Säule, die darüber hinaus noch weiteren Anforderungen standhalten müssen, welche unter 3.4 definiert sind.

Tabelle 1-1: Technische Daten SLIMDrive-660s [1]

Allgemein

Lebensdauer	10.000 Zyklen
Betriebsdauer	2 min AN / 18 min AUS
Max.	Eingangsspannung 35 VDC
Max.	Eingangsstrom 5 A
Gewicht	ca. 1,3 kg

Umgebung

Betriebstemperatur	+10 °C bis +40 °C
Lagerungs- und Versandtemperatur	-10 °C bis +70 °C
Max. Oberflächentemperatur der Antriebseinheit	+70 °C
Luftfeuchtigkeit (bei Betrieb)	5 % bis 85 % (nicht kondensierend)
Feuchtigkeit (bei Lagerung und Transport)	5 % bis 90 % (nicht kondensierend)

Abmessungen

Außendurchmesser	40 mm
Baulänge (auf Mittelrohr-Adapter)	509 mm ±2
Baulänge (auf Stahlspindel)	512 mm ±2
Antriebshub	664 mm ±1

Leistung

Max. dynamische Kraft (bei 38 mm/s)	800 N
Max. statische Kraft (mit abgesteckter Motorsteuerung)	1000 N
Strom bei max. dynamischer Kraft	4.3 A
Spannung bei max. dynamischer Kraft	28 V

1.1.2 Anschlüsse

Für die einzelnen Anschlüsse sind Vorgaben in den Spezifikationen, die für die Inbetriebnahme und den späteren Betrieb notwendig sind.

1.1.2.1 Stahlspindelanschluss

Für die Montage der Stahlspindel ist derzeit ein Sechskant im Bodenblech der Säule notwendig. Dadurch wird die Spindel formschlüssig mit dem Bodenblech verbunden (siehe Abbildung 1-10). Gemäß der Definition wird im weiteren Verlauf der Arbeit die Spindel, vor allem in Zusammenhang der Welle-Nabe-Verbindung, auch als Welle genannt.

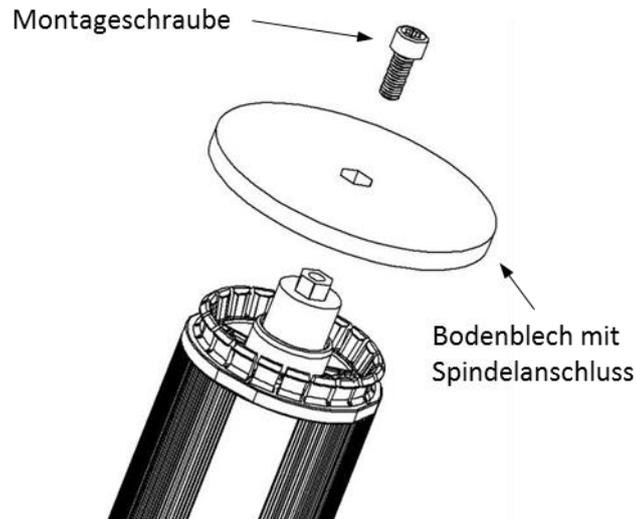


Abbildung 1-10: Stahlspindelanschluss [2]

Abbildung 1-11 zeigt, wie die Bodenplatte als Nabe auszusehen hat, um diese mit dem Sechskant der Spindel formschlüssig verbinden zu können. Anschließend wird die Verbindung mit einer metrischen M4 Schraube gesichert. Per Definition wird die Bohrung beziehungsweise Ausnehmung im Säulenboden auch als Nabe bezeichnet.

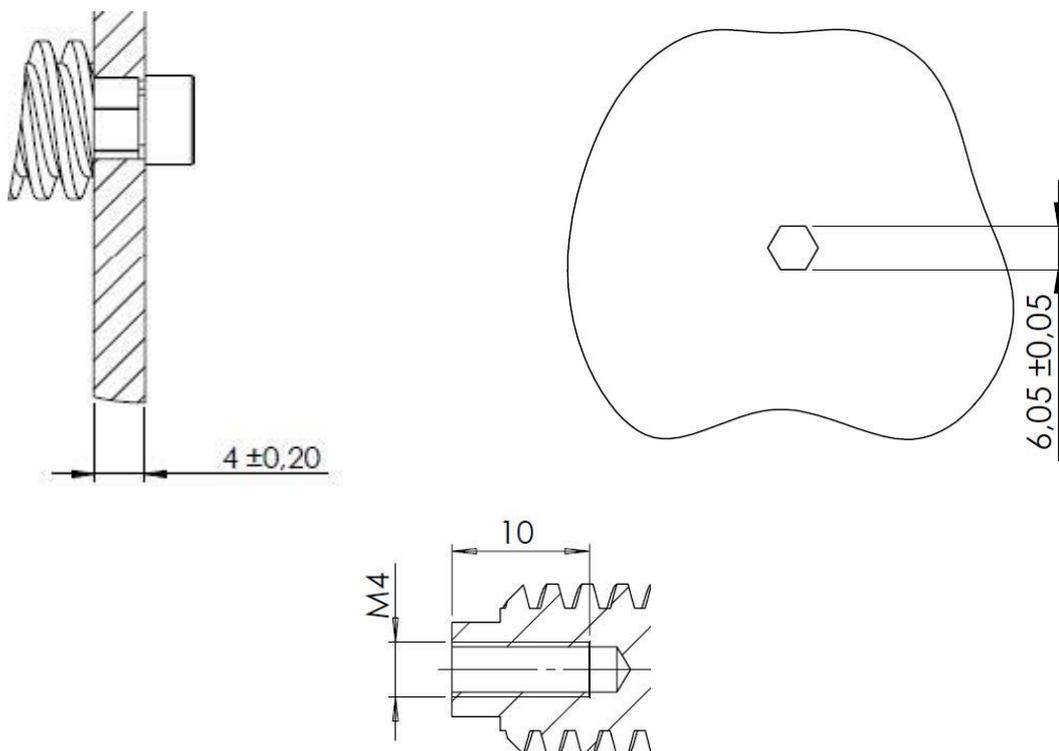


Abbildung 1-11: Stahlspindel- und Bodenplattendesign [2]

1.1.2.2 Stahlspindeleinstellung

Für den Betrieb ist die Stahlspindel samt Mittenrohr korrekt einzustellen (siehe Abbildung 1-12), damit der Antrieb keinen Schaden nimmt. Durch eine ungleichmäßige Längeneinstellung kann sich die Stahlspindel aus der Mutter herausdrehen oder zu weit in die Mutter und den Antrieb schrauben. Die

voreingestellte Länge bei Auslieferung kann aufgrund der nicht vorhandenen Selbsthemmung meist nicht eingehalten werden.

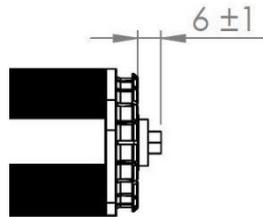


Abbildung 1-12: Längeneinstellung Stahlspindel [2]

1.1.2.3 Mittenrohreinstellung

Abhängig von der Stahlspindeleinstellung wird auch für das Mittenrohr eine Grundeinstellung für den Einbau gefordert (siehe Abbildung 1-13), um die vorhin beschriebenen Probleme bei ungleichmäßiger Längeneinstellung auszuschließen.

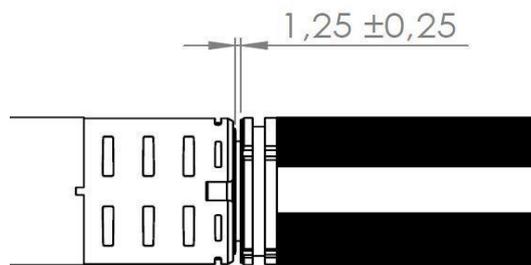


Abbildung 1-13: Längeneinstellung Mittenrohr [2]

1.2 Problemstellung und Lösungsansatz

Bis dato werden Lösungen angeboten die zur Folge haben, dass Kunden unter Verwendung des standardmäßigen Sechskants einen erhöhten Montageaufwand in Kauf nehmen müssen. Ein Teil der Kunden greift aus diesem Grund und wegen der unterschiedlichen Einbaulängen auf eine Adapterlösung zurück, welcher auf den Sechskant der Spindel aufgeschraubt werden kann. Hier ergibt sich das Problem der Variantenvielfalt, da diese Adapterstücke zum Teil von LOGICDATA geliefert werden.

Abnehmer als Kunden genannt sind keine Endkunden sondern Firmen, die Produkte von LOGICDATA kaufen und in deren Produkte einbauen.

Die Mindestbauhöhe wird zur Erfüllung des amerikanischen Standards gefordert, wogegen dies für den europäischen Kunden von geringer Bedeutung ist, da hier der Gesamthub maßgeblich ist. Um diese Problematik zu lösen und einheitliche Spindellängen anbieten zu können, werden somit aufsetzbare Adapter eingesetzt.

Die Relevanz dieser Themenstellung ergibt sich aus dem Ansatz dem Kunden ein „best package“, unter Berücksichtigung der Variantenminimierung für LOGICDATA zu liefern.

- Der Hauptaspekt liegt in einer weitaus einfacheren Montage, welche zukünftig einen höheren Automatisationsgrad erlauben soll. Derzeit werden im Groben fünf Kunden (Großabnehmer) bedient, welche sich aufgrund der unterschiedlichen Abnahmemenge stark im Assemblierungsprozess der Produkte unterscheiden.
- Man nimmt sich dem Thema an, möglichst allen Kunden vor allem jenen, welche einen höheren Automatisierungsgrad anstreben, ein einfacheres und sichereres Anbindungskonzept ausschließlich für die Assemblierung von dual-stage Antrieben anbieten zu können.
- Von den in den späteren Kapiteln beschriebenen drei Anbindungspunkten wird in dieser Arbeit ausschließlich der untere Anbindungspunkt der Stahlspindel überarbeitet. In Abbildung 1-14 sind die Anbindungen des Antriebes in der Säule dargestellt. Die Anforderung an die Stahlspindel beinhaltet eine praktischere Assemblierungsmöglichkeit. Es soll erwähnt sein, dass die Mittenrohrschnittstelle geringere Fügekräfte aufweisen und prozesssicherer gestaltet werden soll, was nicht im Umfang dieser Arbeit liegt und deshalb nur grob gezeigt wird, da sich die mittlere und untere Schnittstelle beim Zusammenbau gegenseitig beeinflussen. Zusätzlich zur Stahlspindelanbindung werden für die Transportsicherung Konzepte ausgearbeitet, um die Problematik des selbsttätigen Verdrehens während Transport und Handling zu verhindern. Es wird nochmals festgehalten, dass die derzeitige Variantenvielfalt seitens LOGICDATA nach Möglichkeit nicht erhöht werden soll.

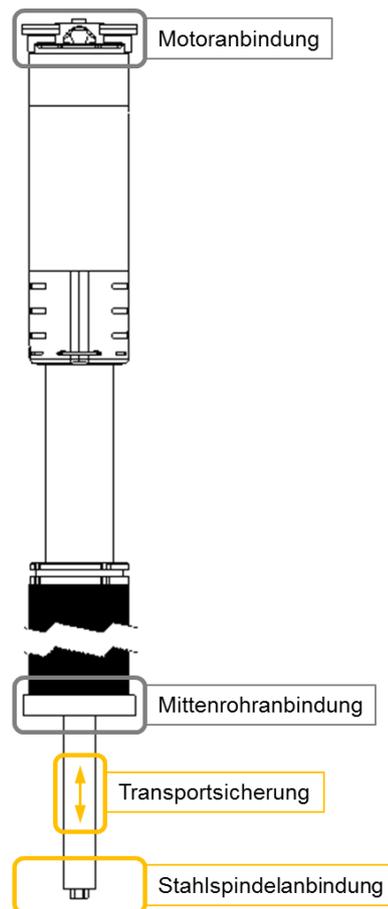


Abbildung 1-14: Anbindungspunkte eines dual-stage Antriebes

1.2.1 Anforderung

Zusammengefasst werden die folgenden Punkte beantwortet:

- Wie muss die Schnittstelle bei der Stahlspindel aussehen, damit allen Kunden eine einfachere Montage ermöglicht wird?
- Wie muss die Anbindung im Bereich der Stahlspindel aussehen, um die Variantenvielfalt für LOGICDATA zu reduzieren?
- Was muss der Kunde an seinen Produkten ändern, um das neue System adaptieren zu können?
- Wie sieht eine Transportsicherung aus, die toleranzunempfindlicher ist als bisher und bis zur Inbetriebnahme nach Produktion, Test, Transport und Lagerung standhält?

Um das unternehmerische Denken in diese Arbeit miteinzubeziehen, wird der Begriff der Qualität in der heutigen Zeit durch das Erreichen von *Kundenanforderungen* spezifiziert. Zum Vergleich des Qualitätsanspruches früherer Zeit, wo eine totale Fehlerfreiheit als Produkteigenschaft manifestiert wurde, würde diese heutzutage die Konkurrenzfähigkeit beeinträchtigen [3, p. 10].

1.2.2 Vorgehensweise

Als Vorgehensweise wird die VDI-Richtlinie 2206 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme in adaptierter Form für das Unternehmen LOGICDATA herangezogen. Für detaillierte Auszüge aus der VDI Richtlinie 2206 wird die Richtlinie VDI 2221 Methodik zum Entwickeln und Konstruieren für sinnvoll erachtet. Bei der Problemstellung bedient man sich am Vorgehen des Denkens in Varianten als Denkansatz aus dem Systems Engineering. In den folgenden Kapiteln werden theoretische Grundlagen als Werkzeuge geschaffen, um Wettbewerbsanalysen durchzuführen und Kundenanforderungen zu spezifizieren. Daraus leitet man Anforderungen sowie Konzepte ab, die aus derzeitiger Sicht erfüllt werden können und somit dem Qualitätsanspruch gerecht werden. Eine schematische Darstellung der Vorgehensweise dieser Arbeit ist in Abbildung 1-15 gezeigt.



Abbildung 1-15: Schematische Vorgehensweise [4, p. 3]

2 Methodische Vorgehensweise

In diesem Kapitel werden theoretische Grundlagen erarbeitet, welche in der methodischen Vorgehensweise dieser Diplomarbeit Anwendung finden. Zudem werden im nachfolgenden Kapitel technische Grundlagen für deren Anwendung in diesem Zusammenhang erklärt sowie Soll-Kriterien abgeleitet und spezifiziert.

2.1 Entwicklungsmethodik in der Mechatronik

Wie eingangs beschrieben, erweist sich für ein Unternehmen, welches im Bereich Mechatronik tätig ist, das Vorgehen in Anlehnung an die VDI 2206 Richtlinie als sinnvoll. Angemessen ist ein flexibles Vorgehen, welches sich auf Elemente der:

- Mikroebene als Problemlösungszyklus;
- Makroebene als V-Modell stützt [5, p. 26].

2.1.1 Mikro-Logik als Problemlösungszyklus

Die folgenden Punkte und Fragestellungen sind im Mikrozyklus enthalten und lehnen sich an [6, p. 71 ff.] an:

- *„Zielsuche bzw. Zielkonkretisierung: Wo stehen wir? Was wollen/brauchen wir? Warum?“*
- *Lösungssuche: Welche Möglichkeiten gibt es?*
- *Auswahl: Welche ist die beste/zweckmäßigste Lösung?“*

Abbildung 2-1 verdeutlicht hierfür die Abfolge der Schritte im Problemlösungszyklus.

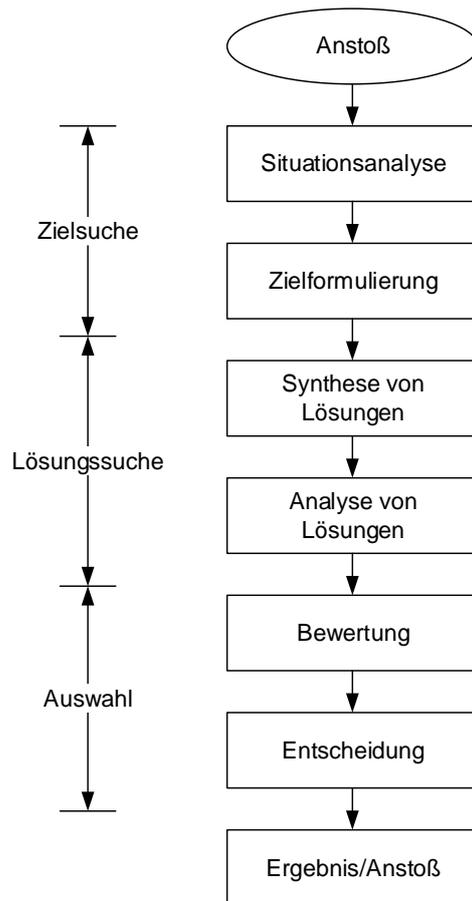


Abbildung 2-1: Problemlösungszyklus als Mikroanalyse [6, p. 72]

2.1.1.1 Zielsuche

Anstoß

Der Anstoß ist Motivation etwas Neues zu schaffen oder etwas Beständiges zu ändern. Dem Anstoß folgt meist eine Vorstudie.

Situationsanalyse

In der Situationsanalyse wird ein Bild vom Ist-Zustand geschaffen, um die Aufgabenstellung zu konkretisieren und somit Ziele konkreter formulieren zu können. Am Ende der Situationsanalyse stehen *qualitative* und *quantitative* Informationen zur Verfügung, um letzten Endes das Problem verständlich zu machen. Anlässlich der Analyse kann sich ergeben, dass Ziele neu definiert werden müssen.

Zielformulierung

Die Anforderungen seitens der Projektauftraggeber sind im Projektantrag beziehungsweise im Lastenheft niedergeschrieben. Prinzipiell ist es möglich hier Änderungen vorzunehmen, wenn tiefer in die Thematik eingedrungen und dadurch ersichtlich wird, dass bestimmte Anforderungen in der festgehaltenen Weise nicht erfüllbar sind. Die Anforderungen werden als Ziele deklariert und die Prioritäten werden in *Muss-*, *Wunsch-* und *Sollziele* gegliedert. Ziele, welche als „Muss“ definiert werden, sind zwingend zu erfüllen. Die angestrebte Erreichung von Wunschzielen entspricht im Wesentlichen einem „nice to have“. Sollziele sind als Zwischennennung der beiden Anderen und werden sehr häufig nicht extra angeführt.

2.1.1.2 Lösungssuche

Synthese von Lösungen

Beim Schritt der Synthese geht es um die Erarbeitung von konstruktiven Lösungen. Aufbauend auf die Ergebnisse der Situationsanalyse und der Zieldefinition werden Lösungsvarianten unter Anwendung von Kreativitätstechniken wie zum Beispiel Brainstorming erstellt.

Analyse von Lösungen

In diesem Analyseschritt werden Lösungen und Konzepte den Anforderungen gegenübergestellt und möglichst kritisch hinsichtlich der Erreichung von Zielen sowie Schwachstellen, die Konzepte zum gegenwärtigen Zeitpunkt aufweisen, untersucht.

Dabei wird deutlich gemacht, ob Mussziele erfüllt werden können und entscheidende Details von Konzepten einen noch zu geringen Detaillierungsgrad aufweisen. Des Weiteren wird untersucht, ob die geforderten Aspekte wie Sicherheit und Zuverlässigkeit gewährleistet werden können und ob die Lösungen aus ökonomischer, technischer und ökologischer Sicht den Voraussetzungen entsprechend beurteilt werden können.

Dieser Schritt bringt eine Grobauswahl mit sich, da hier Konzepte wegfallen, die Mussziele nicht erfüllen können.

Um Lösungsvarianten zu bilden, kann beispielsweise auf die Methodik des morphologischen Kastens zurückgegriffen werden. Es entsteht eine Kombination von Ausprägungen, wodurch mehrere Lösungen entstehen und entsprechend in einer Übersicht dargestellt werden können [7, p. 3]. Unter 2.2.2 wird näher in die Thematik der Variantenbildung eingegangen.

2.1.1.3 Auswahl

Bewertung

Mittels der Bewertung versucht man möglichst objektiv und bei gleichem Detaillierungsgrad Konzepte gegenüberzustellen und dabei das geeignetste herauszufinden. Bei der Bewertung befinden sich ausschließlich Konzepte, die die Mussziele erfüllen und beim vorherhergehenden Schritt nicht eliminiert wurden. Je nach Anforderung und Rahmenbedingung der erarbeiteten Konzepte kann sich eine Bewertungsmethode wie die Nutzwertanalyse als hilfreich erweisen, wie sie im späteren Verlauf dieser Arbeit angewendet wurde.

Entscheidung

Der Entscheidungsprozess gibt Aufschluss darüber, ob Konzepte zu einem ausreichenden Ergebnis geführt haben oder eine erneute Schleife als Iteration zur Konzepterstellung notwendig ist. Sind zufriedenstellende Lösungen das Ergebnis, so kann mit dem nächsten Schritt fortgefahren werden, um eine weitere Detaillierung zu erhalten [5, p. 28]. Für die Punktebewertung und Entscheidung ist unter 2.2.2 eine detaillierte Erklärung mit unterschiedlichen Ebenen in Abbildung 2-7 gezeigt, welche durch Entscheidungen herbeigeführt werden.

Ergebnis

Wie unter dem vorigen Punkt erwähnt, kann eine zufriedenstellende Lösung ein Anstoß für eine nächste Projektphase darstellen. Es kann auch sein, dass es alleinig darum geht, Konzepte zu erarbeiten, um für einen späteren Zeitpunkt Zeitvorteile aus den gewonnenen Erkenntnissen und Konzepten generieren zu können.

[6, p. 71 ff.]

Sinnvollerweise wird der Problemlösungszyklus ins Systems Engineering Vorgehensmodell eingegliedert, wo dieser eine wesentliche Komponente im Gesamtmodell mit den Grundgedanken einnimmt, welches unter 2.2 (Vorgehen des Systems Engineering) beschrieben wird.

Auszug aus [8, p. 1 f.]

Als vorteilhaft erweisen sich abstrakte Modelle, die eine situationsabhängige Anpassung an die Aufgabenstellung ermöglichen. Hinsichtlich Anpassung und Abstraktion wird hierfür der Begriff der Systemkomplexität erwähnt. Systeme werden nach ihrer Komplexität eingeordnet, woraus sich im vorliegenden Fall für die Ideenentwicklung eine entsprechende Handlungsoption ableiten lässt. Aus den beiden Dimensionen der Veränderlichkeit und der Vielfalt lässt sich das Diagramm der Systemkomplexität bestimmen. Das Diagramm besteht aus den vier Feldern: einfach, dynamisch, kompliziert und komplex, wie in Abbildung 2-2 gezeigt.

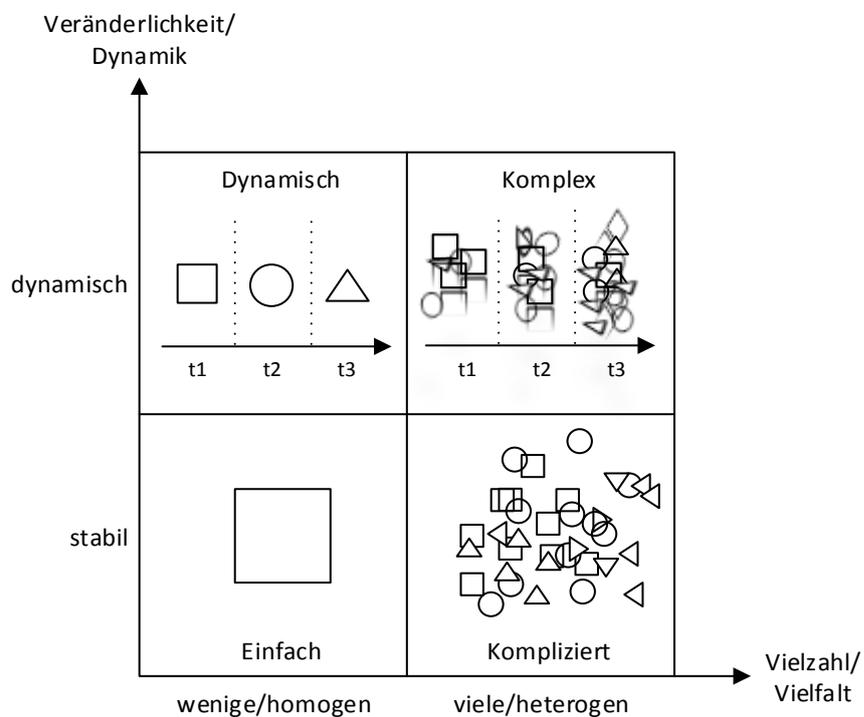


Abbildung 2-2: Systemkomplexität [8, p. 1]

Veränderlichkeit/Dynamik

Die Dynamik eines Systems wird als Änderung über einen betrachteten Zeitraum gesehen. Stabile beziehungsweise statische Systeme erlauben eine zeitaufwendige Untersuchung, wogegen dynamische Systeme oftmals einen bedarfsgerechten und schnellen Untersuchungsansatz erfordern. Die betrachtete Stahlspindelschnittstelle sowie die Transportsicherung der Spindel können als ein System mit einer geringen Veränderlichkeit eingestuft werden. Das Aussehen der Anbindung wird im Wesentlichen von LOGICDATA in Abstimmung mit dem Kunden bestimmt, was über die Zeit gesehen wenig Veränderung erfährt, um eine Kompatibilität der Antriebe zu den Säulen zu gewährleisten.

Vielzahl/Vielfalt

Die Vielfalt ergibt sich aus der Anzahl verschiedener Elemente, die zusammenhängen oder voneinander unabhängig sein können. Systeme mit vielen heterogenen Bestandteilen werden als kompliziert eingestuft. Untersucht man die behandelten Themengebiete in dieser Arbeit nach ihrer Vielzahl, so kann

man die Transportsicherung als einfach einstufen. Hingegen geht die Anbindung der Stahlspindel in Richtung kompliziert, da es viele Anpassungen an den jeweiligen Kunden gibt.

Auszug aus [8, p. 1 f]

Den beschriebenen Anstoß bildet die zu Beginn beschriebene Problemsituation in der Ausgangssituation (Ist-Zustand) mit dem Fokus einer erleichterten Montage, einer prozesssicheren Transportsicherung und der Minimierung der Variantenvielfalt. Das Problem der Variantenvielfalt liegt in den unterschiedlichen Längen der Stahlspindel sowie den diversen Adapteraufsätzen, die für Kunden teils notwendig sind. Adapter finden aus zwei Gründen Einsatz. Zum einen um die Bauhöhe des Antriebes zu erhöhen, was für europäische Kunden relevant ist, und zum anderen für die Montageerleichterung. Das heißt, dass im vorliegenden Fall eine Zielformulierung stattgefunden hat, welche von den sogenannten Projektauftraggebern stammt. Die dabei als Soll-Zustand definierten Anforderungen müssen in verschiedene physikalische Eigenschaften gegliedert werden, wie beispielsweise das Funktionsprinzip oder eine Kraftsituation, welche in Kapitel 3 (Theoretische und technische Grundlagen) und 3.3 (Anforderungen an Drop&Drive) erklärt werden. Diese Gliederung ermöglicht eine zunehmend lösungsorientierte Informationsbeschaffung.

Im Bereich der Lösungssuche wurden diverse Methoden mit Personen aus dem Unternehmen in unterschiedlichen Aufgabenbereichen angewendet, um möglichst kreative und unabhängige Konzepte zu erarbeiten. Angewendet wurden Methoden nach dem klassischen Brainstorming Modell sowie die sogenannte 6-3-5 Methode in abgewandelter Form als 3-3-5 Modell mit drei Teilnehmern, drei Zeilen und fünf Minuten Zeit zur Ideengenerierung [9, p. 279]. In Summe konnten mit dieser abgeänderten 3-3-5 Methode 45 Konzepte erarbeitet werden, wobei bei dieser Anwendung nicht ausschließlich neue Konzepte erstellt wurden, sondern oftmals eine Erweiterung vorhergegangener Konzepte erfolgte, was qualitativ höherwertigere Konzepte zur Folge hatte. Zudem wurde ein online Brainstorming durchgeführt, wo die Aufgabenstellung per Mail bekanntgegeben wurde und so Personen ihre Überlegungen kundtun konnten. Es sollte im Vorhinein abgeklärt werden, ob der Fokus auf die Qualität oder die Quantität für die Konzeptausarbeitung gerichtet war, denn je nachdem erwiesen sich unterschiedliche Kreativitätstechniken als sinnvoll.

Durch den Analyseprozess wurden dabei umsetzbare Konzepte fokussiert und weniger realisierbare eliminiert. Für die Stahlspindel wurden nahezu ein Dutzend Konzepte in eine weitere Detaillierungsphase unter Anwendung von computerbasierter Konstruktion (CAD) aufgenommen. Zur Fixierung der Stahlspindel wurden drei Konzepte erarbeitet, wobei man sich im Nachhinein bewusst war, dass es nahezu keine Möglichkeit gab, zwei der drei Konzepte in der Serie zu verwirklichen. Gründe dafür waren zusätzliche Bauteile, zu hohe Kosten, komplizierte Prozesse bei der Montage oder schwer kontrollierbare Verfahren bei der Längeneinstellung der Spindel.

Im Auswahlschritt wurden zu Beginn Kriterien definiert. Abgeleitet von vorgegebenen Zielen wurden diese für die Bewertung der Konzepte herangezogen. Dabei bediente man sich des paarweisen Vergleichs, welcher firmenintern unter insgesamt 18 Personen verschiedener, jedoch themenbetroffener Abteilungen durchgeführt wurde. Der paarweise Vergleich ergab mit den folgenden Kriterien eine Gewichtung untereinander.

Folgende Kriterien wurden für die Bewertung herangezogen:

- Fixe Kosten für Kunden
- Stückkosten für Kunden
- Montageprozess beim Kunden
- Transportsicherung
- Kosten für LOGICDATA
- Lösbare Verbindung

Unter fixe Kosten für den Kunden werden die Anschaffungs- sowie Umrüstkosten verstanden, welche entstehen würden, um vom Ist-Stand der Assemblierung auf den Soll-Stand zu kommen. Dieses Kriterium wurde als Unterscheidung zwischen großen und kleinen Kunden eingeführt. Als Stückkosten wurden die Kosten des Assemblierungsprozesses und im Speziellen die Teilekosten (Schrauben, Kleinteile, etc.) betrachtet. Der Montageprozess beim Kunden wird als Einfachheit des Einbauprozesses mit Hilfe von Vorrichtungen verstanden. Dieses Kriterium fließt direkt in die Stückkosten ein, da eine Zeitabhängigkeit gegeben ist. Wobei auch hier eine Trennung zwischen den einzelnen Kunden notwendig war. Die Stahlspindel bei dual-stage Antrieben ist aufgrund der Geometrie nicht selbsthemmend, was während des Assemblierungsprozesses beziehungsweise während des Transportes dazu führen kann, dass sich die Spindel aus der Spindelmutter herausdreht. Das Hineindreuen wurde nicht als kritisch angesehen, da die Auslieferung im eingefahrenen Zustand erfolgt und konstruktionsbedingt die Spindel sich nicht komplett in den Antrieb drehen kann. Die Problematik der Selbsthemmung ergibt sich lediglich mit der Stahlspindel, wie unter 3.1 erläutert ist.

2.1.2 Das V-Modell als Makrozyklus

Zur Vorgehensweise in der Entwicklungsmethodik der Mechatronik-Branche bietet das V-Modell (Abbildung 2-3) eine logische Abfolge von Arbeitsschritten.

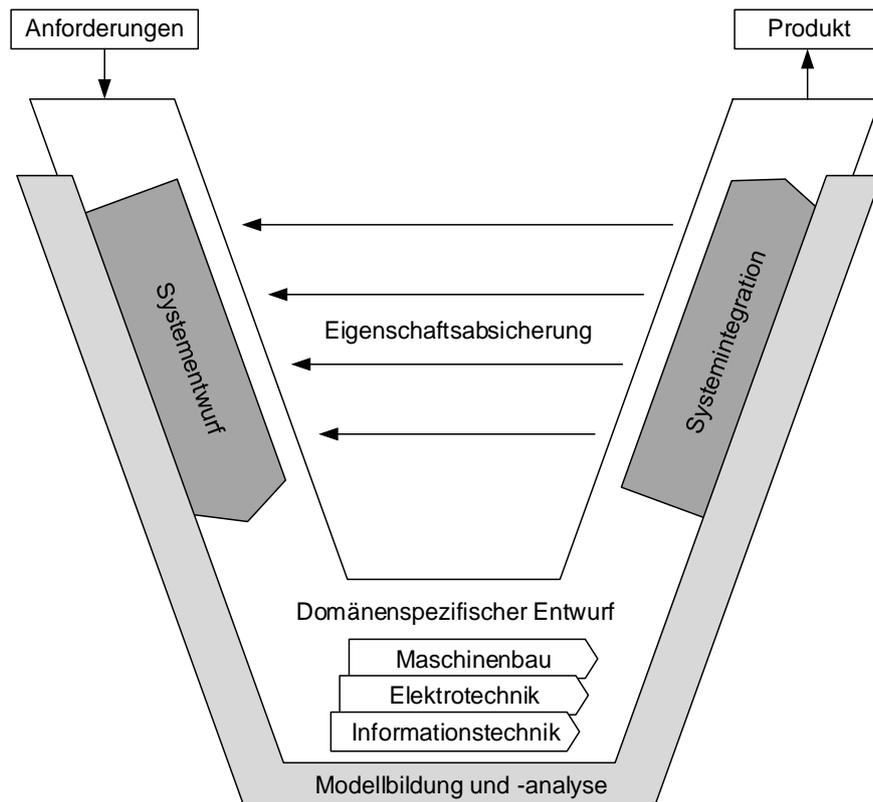


Abbildung 2-3: Makrozyklus nach dem V-Modell nach der VDI 2206 Richtlinie [5, p. 29]

Die folgende Erklärung der Begriffe findet in Anlehnung an [5, p. 22 ff.] statt.

Anforderungen

Die Anforderungen müssen für eine explizite Aufgabenstellung klar definiert sein. Konzepte sowie Prototypen werden nach diesen Anforderungen bewertet.

Systementwurf

Der Systementwurf bildet die physikalischen und logischen Wirkungsweisen von Konzepten ab. Wie unter 2.2.1 (Vom Groben zum Detail) erläutert wird, findet eine Abstrahierung statt, die Gesamtstrukturen auf elementare Funktionen herabsetzt.

Domänenspezifischer Entwurf

Hier erfolgt eine weitere Konkretisierung der Konzepte in den unterschiedlichen Domänen. Die Detaillierung ist essentiell für die Absicherung von komplizierten Funktionen.

Systemintegration

Bei der Systemintegration erfolgt die Zusammenführung von den einzelnen Ergebnissen zu einem Gesamtsystem, was zur Überprüfung der Zusammenwirkung von den einzelnen Domänen notwendig ist.

Eigenschaftsabsicherung

Um nicht Gefahr zu laufen an den ursprünglichen Spezifikationen vorbei zu entwickeln, ist eine kontinuierliche Erhebung der Eigenschaften der Konzepte durchzuführen. Diese müssen den tatsächlichen Anforderungen weitestgehend entsprechen.

Modellbildung und -analyse

Die beschriebenen Phasen werden durch geeignete Modellbildung und Simulation über den gesamten Prozess begleitet, um Erkenntnisse über die Funktionsweise zu erhalten. Es wird erwähnt, dass hier ein erneuter Durchlauf des Zyklus beziehungsweise eine Schleife bei noch nicht beendetem erstem Durchlauf initiiert werden kann.

Produkt

Als Endergebnis steht das Produkt, das beispielsweise ein Prototyp oder Serienmuster sein kann. Je nach Umfang der Entwicklungsaufgaben wird dieser Zyklus mehrmals durchlaufen.

[5, p. 22 ff.]

2.1.3 Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien

„Eine Konstruktion ist der Versuch der Übertragbarkeit, einer Vorhersage aus der Summe der bekannten und angewandten Erkenntnisse der retrospektiven Analyse der Vergangenheit, wobei gleich gelagerte und ähnliche Fälle die Güte der Vorhersage erhöhen.“ [10, p. 5]

Wie unter 2.1 (Entwicklungsmethodik in der Mechatronik) beschrieben, wird dieser allgemeine Prozess nach der VDI 2206 Richtlinie für ein Mechatronik-Unternehmen wie LOGICDATA für sinnvoll erachtet. Da es sich bei diesem Projekt- und Diplomarbeitsthema ausschließlich um mechanische Komponenten handelt, ist es interessant tiefer in die Thematik des methodischen Entwickelns und Konstruierens einzutauchen. Als eine geeignete Basis erweist sich hier die Anlehnung an die VDI 2221 Richtlinie, welche diese genannten Gebiete behandelt. Ein Auszug aus dieser Richtlinie findet sich in Abbildung 2-4 in vertiefter Form als VDI 2222 Blatt 1. Der dargestellte Ablauf zeigt grundsätzlich die Vorgehensweise, wie sie in der übergeordneten Richtlinie nach VDI 2221 beschrieben ist. Hier wird die gesamte Methodik zum Entwickeln und Konstruieren behandelt.

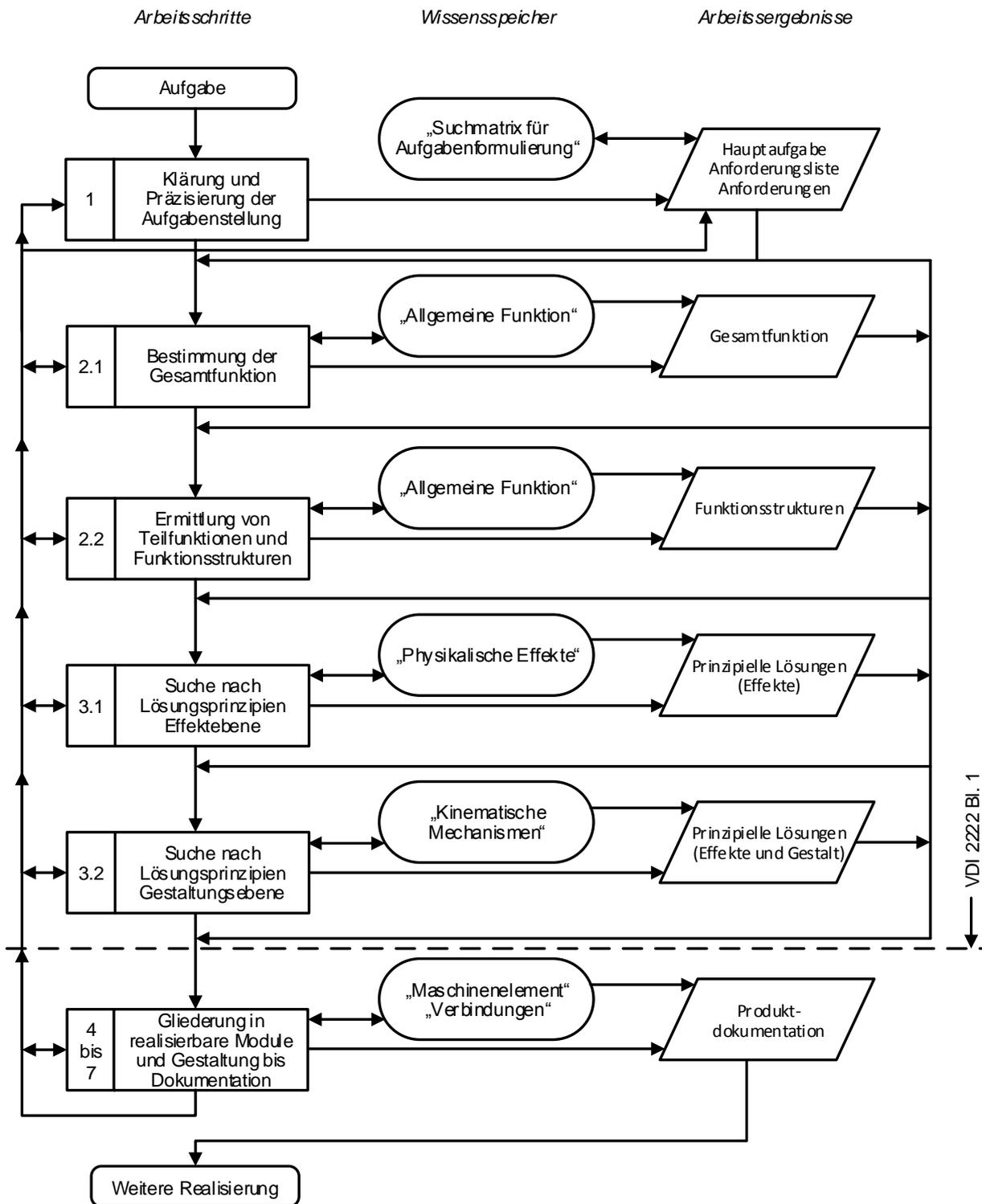


Abbildung 2-4: Vorgehensweise für methodisches Konstruieren nach VDI 2221 [11, p. 5]

Die VDI 2222 hat dies so gegliedert [11, p. 2], dass mit 1 „Klärung und Präzisierung der Aufgabenstellung“ begonnen wird und dies bis zu 3 „Suche nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen“ [11, p. 2] durchlaufen wird. Prinzipiell gliedert sich der Entwicklungs- und Konstruktionsprozess in 7 Arbeitsschritte. Ein wichtiger Aspekt ist, dass Abschnitte vollständig, teilweise oder mehrmals iterativ durchlaufen werden können. Grundsätzlich findet eine Anpassung der Anforderungsliste durch entwicklungsbegleitende Präzisierung und gegebenenfalls Modifizierung

mehrmals im Durchlauf der Phasen statt [3, p. 2]. Allgemein kann gesagt werden, dass Aufgaben durch einen Anstoß entstehen, welcher aus verschiedenen Gründen erfolgen kann und der grundsätzlich von der höchsten Unternehmensebene stammt. Im vorliegenden Fall ist ein aufgetretenes Problem der Auslöser für eine Neu- beziehungsweise Änderungskonstruktion. Bei der Bestimmung der Hauptfunktion für methodisches Konstruieren werden Anforderungen spezifiziert, Anforderungslisten geschrieben und die Hauptaufgabe in den Fokus gestellt. Zur Bestimmung der Gesamtfunktion wird das Modell auf wesentliche Funktionen abstrahiert, um daraus für den nächsten Schritt Teilfunktionen ableiten zu können. Die Aufspaltung in einzelne Teilfunktionen und Funktionsstrukturen, welche aus der Gesamtfunktion abgeleitet werden, erlaubt für die weiteren Schritte eine effiziente Vorgehensweise. Als Basis für die Lösungssuche dient der vorige Schritt der Bestimmung von Teilfunktionen, um hier physikalische Effekte und unter anderem das technische Verständnis anwenden zu können. Als Ergebnis erhält man bereits prinzipielle Lösungen. Auf der Gestaltungsebene werden Ideen detaillierter umgesetzt, die beispielsweise aus Kreativitätsmethoden gewonnen werden. Nachfolgende Schritte, die über die VDI 2222 Blatt 1 hinausgehen, beinhalten eine weitere Detaillierung von realisierbaren Modulen sowie die Dokumentation und sind nicht im Umfang dieser Arbeit enthalten. Je nach Art der Aufgabenstellung werden nur Teile und nicht alle Phasen, wie sie in Abbildung 2-4 dargestellt sind, durchlaufen. Unter Anbetracht der Situation ergibt sich im Grunde genommen eine Neu- beziehungsweise Anpassungskonstruktion, die die Phasen des Konzipierens, Entwerfens und Ausarbeitens beinhaltet, wie es in Abbildung 2-5 gezeigt ist. Eine Neukonstruktion findet beispielsweise bei der Transportsicherung statt, wo ein neues Funktionsprinzip das bisherige mit der Befestigung von Teflonbändern und Klebepunkten ersetzen soll. Für die Stahlspindelanbindung findet eine Mischung aus einer Neu- und Anpassungskonstruktion statt, auch unter der Berücksichtigung von Kundenwünschen und Anfragen.

Konstruktionsarten		Konstruktionsphasen			
		Konzipieren		Entwerfen	Ausarbeiten
Gruppenbegriffe	gebräuchliche Begriffe der Praxis	Funktionsfindung	Prinzip-erarbeitung	Gestaltung	Detaillierung
Neukonstruktion	Neukonstruktion	[Hatched bar spanning all phases]			
	Entwicklungskonstruktion	[Hatched bar spanning all phases]			
	Angebotskonstruktion	[Hatched bar]	[Hatched bar]		
Anpassungskonstruktion	Anpassungskonstruktion	[Hatched bar spanning all phases]			
	Angebotskonstruktion	[Hatched bar spanning all phases]			
	Fertigungskonstruktion	[Hatched bar spanning all phases]			
	Änderungskonstruktion	[Hatched bar spanning all phases]			
Variantenkonstruktion	Variantenkonstruktion	[Hatched bar spanning all phases]			
Konstruktion mit festem Prinzip	Prinzipkonstruktion	[Hatched bar spanning all phases]			

Abbildung 2-5: Konstruktionsarten und Konstruktionsphasen nach Aufgabenstellung [12, p. 12]

2.2 Vorgehen des Systems Engineering

Der folgende Absatz ist an [13, p. 15 f.] angelehnt. Dem Vorgehensmodell nach Systems-Engineering liegen vier Grundgedanken zugrunde, welche als Kombination der zu verwendenden Komponenten angedacht sind:

Vom Groben zum Detail

Denken in Varianten

Gliederung in Projektphasen

Problemlösungszyklus bei der Lösung von Problemen anwenden

Aufgrund der im Vorhinein für diese Arbeit beschlossenen Themengebiete sind im Speziellen diese Komponenten unter Ausschluss der Gliederung in Projektphasen von Bedeutung. In Verbindung mit den vorher genannten VDI Richtlinien als allgemeine Vorgehensweise mit den tiefgreifenden Methoden des Systems-Engineering ist es möglich, sehr effizient und effektiv das Thema abzuarbeiten.

2.2.1 Vom Groben zum Detail

Es empfiehlt sich hier die Vorgehensweise nach dem top-down Prinzip, da es sich um die Erarbeitung neuer und vom bisherigen System unabhängiger Lösung handelt [13]. Unter dem top-down Prinzip versteht man das Vorgehen vom Groben zum Detail, wie es in Abbildung 2-6 gezeigt ist.

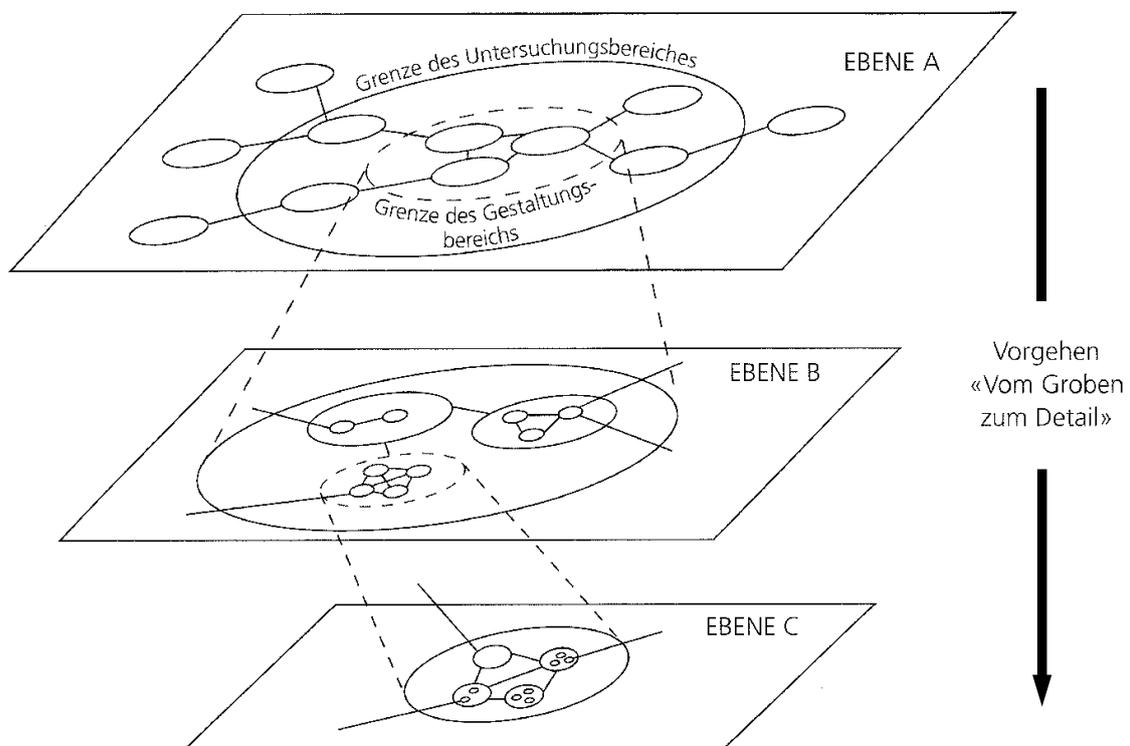


Abbildung 2-6: Top-down Betrachtungsweise [6, p. 59]

Diese Methode, welche komplizierte Funktionsstrukturen in abstrakte Gebilde herunterbricht, ist ebenso in der beschriebenen VDI 2222 Blatt 1 Richtlinie festgelegt. Im weiteren Fortschritt der Arbeit zeigt sich der Vorteil der Methode des Abstrahierens.

Folgende Überlegungen basieren auf [13, p. 16 f.]. Die Strategie des Vorgehens ist gemäß Abbildung 2-7 beschrieben, die besagt, dass das Betrachtungsfeld anfänglich weit gewählt wird, um möglichst viel zu berücksichtigen. Anschließend folgt die stufenweise Einengung von Problemsituationen und Lösungen. Erst wenn das Problemfeld von der Umwelt abgegrenzt und eingebettet ist, kann mit einer Detaillierung begonnen werden, was der Anwendung des Systemdenkens entspricht. Für die Lösungsgenerierung werden zuerst allgemeine Ziele festgelegt, bevor Ergebnisse schrittweise konkretisiert werden. Hier dienen Konzepte in höheren Ebenen als Orientierungshilfe für eine detaillierte Gestaltung.

2.2.2 Stufenweise Variantenbildung

Zur Konzeptausarbeitung wird gemäß Abbildung 2-7 mit der obersten Ebene der Variantenbildung von Lösungsprinzipien begonnen. Der nächste Schritt beinhaltet die Auswahl von geeigneten Varianten sowie der Ausscheidung von nicht geeigneten Varianten. Danach folgt der Schritt der Beurteilung und Auswahl sowie der anschließenden Ausarbeitung von Detailvarianten.

[13, p. 16 f.]

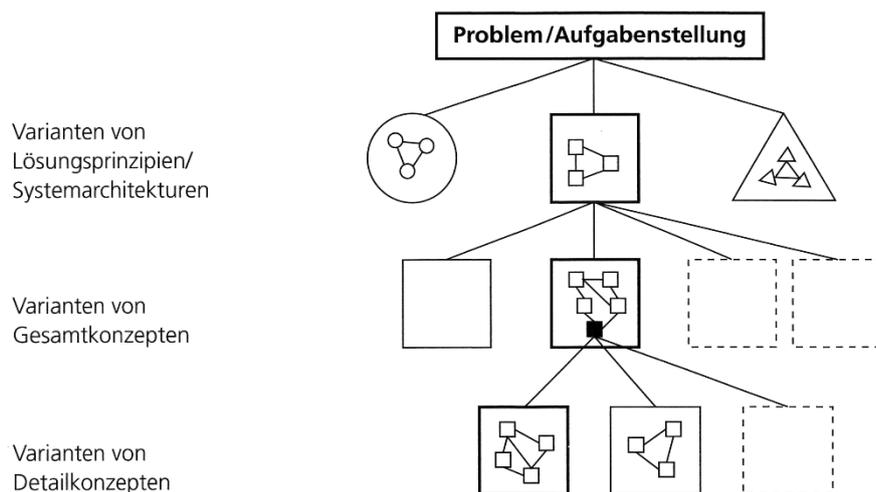


Abbildung 2-7: Stufenweise Variantenbildung und Ausscheidung, verbunden mit dem Vorgehensprinzip „Vom Groben zum Detail“ [6, p. 60]

2.3 Nutzwertanalyse

Die Nutzwertanalyse dient dazu, Alternativen von Konzepten und Vorschlägen möglichst objektiv zu bewerten und auszuwählen. Für diesen Prozess wird ein Teilnehmerkreis mit Personen, die eine spezifische Expertise einbringen können oder eine in ihrem jeweiligen Bereich Entscheidungsbefugnis aufweisen, ausgewählt. Generell ist ein Moderator, der auch im Abstimmungsgremium mitstimmen kann, sinnvoll. Dies soll der Fall sein, wenn der Teilnehmerkreis wenig über die Funktionsweise der zu bewertenden Konzepte Bescheid weiß.

Für den gesamten Analyseprozess wurde die folgende Vorgehensweise in angepasster Form als sinnvoll erachtet [14]:

Organisation des Arbeitsumfeldes

Wie bereits im vorigen Absatz erwähnt wurde, ist für den Analysevorgang ein Teilnehmerkreis auszuwählen, der mit der Thematik in Verbindung steht oder von höherer hierarchischer Ebene in den Entscheidungsprozess miteingebunden werden kann.

Benennung des Entscheidungsproblems

Bei der hier relevanten Nutzwertanalyse geht es darum, Alternativmöglichkeiten in Form von unterschiedlichen Konzepten zu sortieren und priorisieren. Alle Alternativmöglichkeiten erhalten durch das Verfahren einen bestimmten Nutzwert. Für den Fall der Stahlspindelanbindung und der Transportsicherung wird das Entscheidungsproblem als Auswahl eines neuen Konzeptes definiert. Die exemplarische Zielformulierung kann mit der Wahl eines Konzeptes mit den geringsten Kompromissen und niedrigsten Kosten beschrieben werden.

Auswahl der Entscheidungsalternativen

Die Entscheidungsalternativen sind in dieser Arbeit in Form von Konzepten, die im Vorhinein durch Anwendung von Kreativitätstechniken erarbeitet wurden, bereits vorhanden und stehen bei dem Analyseprozess zur Bewertung.

Sammlung von Entscheidungskriterien

Entscheidungskriterien sind Themen, die für die Entscheidung des Problems relevant sind. Dieser Vorgang wird unter Einbezug von Entscheidungsträgern durchgeführt, wobei die Kriterien die Merkmale von Vollständigkeit, Bewertbarkeit, Relevanz und Reproduzierbarkeit aufweisen sollen.

Gewichtung der Entscheidungskriterien

Um diese Entscheidungskriterien entsprechend objektiv zu priorisieren, erweist sich hier die Anwendung der Paarvergleichsmethode als sinnvoll. Bei der Methode werden die zuvor bestimmten Kriterien gegeneinander bewertet, was besagt, dass ein Kriterium wichtiger, gleich wichtig oder weniger wichtig als das andere ist.

Bewertung der Entscheidungskriterien

Die bewerteten Entscheidungskriterien werden anhand des paarweisen Vergleichs gewichtet, die in Summe 100 % ergeben. Aus der Gewichtung wird ein entsprechendes Punktwertsystem abgeleitet.

Nutzwertberechnung

Bei der Nutzwertberechnung wird im Gremium die Bewertung mit Punkten für das jeweilige Konzept durchgeführt. Höhere Punktwerte entsprechen einer besseren Bewertung, die anschließend mit den Punkten aus der Gewichtung der Entscheidungskriterien multipliziert wird. Am Ende werden alle multiplizierten Punkte mit den Entscheidungskriterien summiert und ergeben somit eine Priorisierung der Konzepte.

3 Theoretische und technische Grundlagen

Für den Konzepteschrift im Entwicklungsprozess ist es notwendig, das technische System mit allen Anforderungen und deren Gegebenheiten zu verstehen. Ausgehend vom methodischen Konstruieren nach VDI 2222 Blatt 1 werden reale Modelle aus technischer Sicht mit all ihrer Komplexität auf möglichst wenige Modelle abstrahiert, was in den folgenden Punkten Anwendung findet.

3.1 Theorie zu Bewegungsschrauben

Hier werden theoretische Grundlagen zu Spindeln erklärt, die für die Konzeptausarbeitung und die weiteren Phasen notwendig sind.

3.1.1 Kräftesituation

Beschrieben wird ein höhenverstellbarer Tisch, der im abstrakten Fall als eine Masse modelliert wird und wo die Berechnung über eine Energiebilanz erfolgt. Für die Erhöhung von potentieller Energie in einem Gravitationsfeld muss von außen Energie zugeführt werden. In diesem Fall wird die potentielle Energie des Systems durch elektrische Energie erhöht. Die elektrische Energie aus dem Stromnetz wird durch eine Steuerung auf ein für einen Elektromotor brauchbares Niveau transformiert, der anschließend gespeist wird und welcher die mechanische Energie zum Heben der Last bereitstellt. Am Ende des Motors ist für die Drehzahlreduktion und Drehmomenterhöhung ein zweistufiges Planetengetriebe angeflanscht. Anschließend wird die mechanische Rotationsenergie in eine Zweifach-Teleskopspindel eingeleitet, welche die Drehbewegung in eine mechanische translatorische Bewegung wandelt. Als Ausgangsbasis für die erste Abstraktionsebene dient der Tisch als reales Gesamtsystem. Ein weiterer Abstraktionsschritt in Richtung der Anbindung des Antriebs entsteht durch die Darstellung des Tischbeines. Löst man unter Weiterverfolgung der Abstrahierung den Antrieb heraus, so entsteht die elementare Grundsituation zur Abschätzung der Belastung, wie sie in Abbildung 3-1 dargestellt ist.

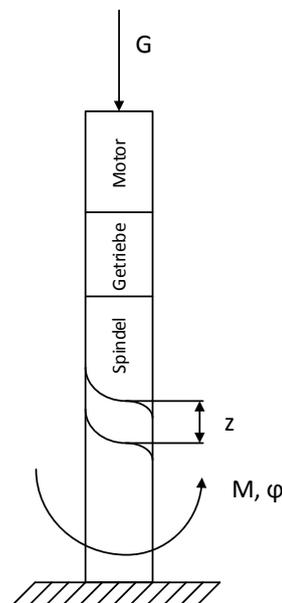


Abbildung 3-1: Abstrahierung der Antriebseinheit auf elementare Funktionen

Auf einfache Weise lässt sich über den Arbeitssatz die Gleichung über die virtuelle Arbeit für den *reibungsfreien* Fall wie folgt aufstellen [15, p. 221 ff.]:

$$\sum \delta W = M \cdot \delta \varphi - G \cdot \delta z = 0 \quad (3-1)$$

δ	virtuelle Größe [-]
W	Arbeit [J]
M	Moment [Nm]
G	Kraft [N]
φ	Winkel; wird zu 2π bei einer Umdrehung [rad]
z	Höhe; wird zur Steigungshöhe (P_h als Steigung) bei einer Umdrehung [mm]

Durch Integration und Umstellung der Gleichung (3-1) auf (3-2) lässt sich das Moment bei aufgebrachtener Last errechnen. Dies entspricht dem auf die Schnittstelle wirkenden Abstützmoment. Unter der Annahme, dass die geforderte Last für das Gesamtsystem Tisch 1200 N beträgt, ergibt sich eine Last von 600 N pro Antriebsseite bei zwei Tischbeinen. Mit der Annahme von $g:=10 \text{ m/s}^2$ und einer gesamten Spindelsteigung von 10 mm (5 mm pro Spindel), eingesetzt in der SI-Einheit Meter, errechnet sich daraus ein Abstützmoment von circa 1 Nm.

$$M = \frac{G \cdot z}{\varphi} \quad (3-2)$$

Aus der abstrakten Betrachtungsweise ergibt sich für den gesamten Antrieb eine Einspannsituation, wo Kräfte und Momente an das Tischgestell über die Schnittstellen weitergeleitet werden. Zur Abstützung vom Drehmoment erfolgt zudem die Kraftabstützung in Zug- und Druckrichtung. Die Kräfte und Momente, die in den Anforderungen deklariert sind, werden beim sogenannten „End-of-Line-“ (EOL) sowie beim „Run-In-Test“ auf den Antrieb vor Auslieferung aufgebracht, um die geforderte Qualität zu gewährleisten. Diese Werte sind für die Auslegung des Antriebes und in weiterer Folge der Schnittstelle heranzuziehen. Aufgebrachte Axialkräfte betragen beim EOL-Test in Zugrichtung 500 N, wogegen die Kräfte in Druckrichtung mit 1200 N wirken. Zugkräfte treten im realen Fall unter Standardbedingungen nicht auf, da die Last der zu senkenden Komponenten größer als die Reibkraft in der Säule ist. Real wird für das theoretische Modell ohne Reibungseinfluss ein Moment von 3 Nm in der Spezifikation angenommen. Dies schließt zusätzlich einen Sicherheitsfaktor ein.

3.1.2 Gewindekenngrößen und Kräftesituation an Bewegungsgewinden

In Abbildung 3-2 ist die Abwicklung einer Schraubenlinie für ein eingängiges Gewinde gezeigt. Die Gewindesteigung ist der Weg, den die Spindelmutter bei einer Umdrehung von 360° zurücklegt. Der Steigungswinkel wird über die geometrische Beziehung aus Umfang und Steigung errechnet.

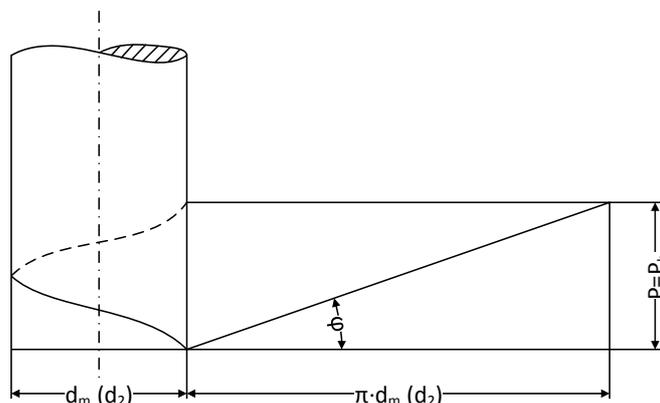


Abbildung 3-2: Abwicklung einer Schraubenlinie bei einem eingängigen Gewinde

Die Steigung des Gewindes definiert sich über die Teilung und die Gangzahl wie folgt [16, p. 236]:

$$P_h = P \cdot n \quad (3-3)$$

φ	Steigungswinkel [°]
d_2	Flankendurchmesser Gewinde [mm]
P	Teilung des Gewindes [mm]
n	Gangzahl
P_h	Gewindesteigung [mm]
μ	Reibkoeffizient [-]

$$\tan \varphi = \frac{P_h}{\pi \cdot d_2} \quad (3-4)$$

Der Steigungswinkel der zweigängigen Stahlspindel mit einem Flankendurchmesser von 11,23 mm, wurde durch Umstellen der Gleichung (3-4) mit 8,2° ermittelt.

Ein Bewegungsgewinde wird selbsthemmend genannt, wenn es trotz Belastung im Ruhezustand verharrt. Ist der Reibungswinkel größer als der Steigungswinkel, so liegt Selbsthemmung vor [17, p. 4]; [18, p. 307]. Als ein Reibmodell kann ein Körper auf einer schiefen Ebene modelliert werden (Abbildung 3-3), wo beim Übergang zum Gleiten $\mu = \tan \varphi$ vorliegt, was sich aus dem Kräftegleichgewicht ermitteln lässt.

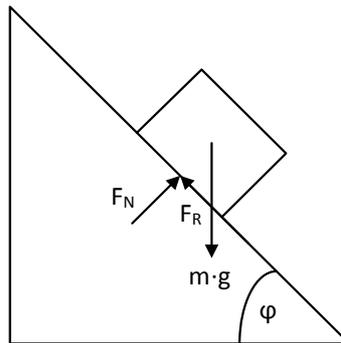


Abbildung 3-3: Reibkraftmodell an einer schiefen Ebene

Der Reibkoeffizient μ zwischen Gewinde und Mutter ist von diversen Parametern abhängig, wie zum Beispiel Umgebungstemperatur, Luftfeuchtigkeit, Last, Materialpaarung, Fertigungstoleranzen, Steigungswinkel und Schmierfett. Unter Berücksichtigung von Reibung können am Flachgewinde folgende Kraftsituationen gezeigt werden:

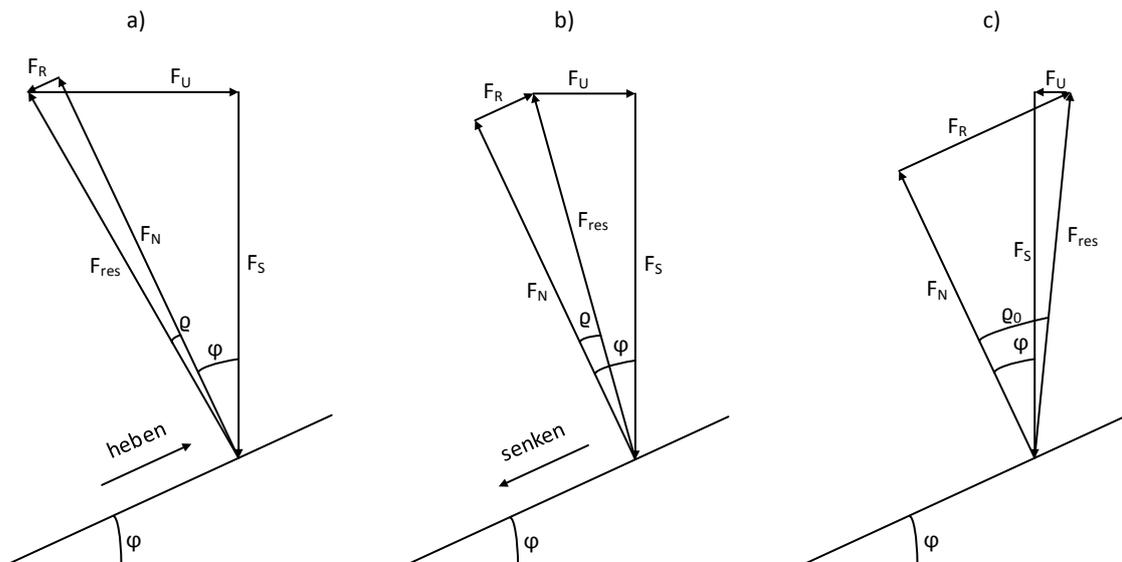


Abbildung 3-4: Kräfte am Flachgewinde (F_S Längskraft, F_U Umfangskraft, F_N Normalkraft, F_R Reibkraft, F_{res} resultierende Kraft φ Steigungswinkel, ρ Reibwinkel) [18, p. 294 f.]; [12, p. 403]
 a) Heben; keine Selbsthemmung
 b) Senken; keine Selbsthemmung
 c) Selbsthemmung

Im Fall des Antriebes LOGICdrive-660s wurden Reibwerte bei konstanten Umgebungsbedingungen und gleichem Schmierfett bei einer Last von 200 N mit 0,18 und bei 800 N Last mit 0,13 empirisch ermittelt. Die Reibwerte sind bei Konstanthalten der Parameter nahezu linear von der Last abhängig [19]. Der Grenzfall der Selbsthemmung liegt bei Nullwerden der Umfangskraft vor (siehe Abbildung 3-4). Bei Vorliegen von Selbsthemmung dreht sich die Richtung der Umfangskraft um. Das bedeutet, dass diese aufgebracht werden muss, um die Spindel beziehungsweise die Mutter in Bewegung zu setzen.

Für ein Flachgewinde (Flankenwinkel α ist Null) ergibt sich die aufzubringende Kraft bei nicht selbsthemmender Spindel aus

$$F_U = F_S \cdot \tan(\varphi - \rho) \quad (3-5)$$

und bei Vorliegen von Selbsthemmung

$$F_U = F_S \cdot \tan(\rho_0 - \varphi) \quad (3-6)$$

Für den praktischen Fall kommen aufgrund der einfacheren und kostengünstigeren Fertigung meist Gewinde mit schrägen Flanken zum Einsatz (siehe Abbildung 3-5). Beim eingesetzten zweigängigen Gewinde bei den dual-stage Antrieben beträgt der Flankenwinkel 30° .

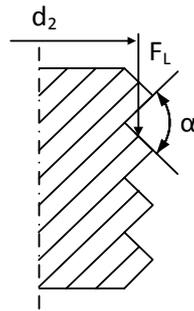


Abbildung 3-5: Kräfte am Spitzgewinde

α	Flankenwinkel [°]
d_2	Flankendurchmesser [mm]
F_L	Last [N]

Die oben getroffenen Annahmen treffen sowohl für Befestigungsgewinde als auch für Bewegungsgewinde zu. Im Allgemeinen sind Befestigungsgewinde aufgrund des geringeren Steigungswinkels immer selbsthemmend, weshalb eine genaue Ermittlung des Reibwertes nicht notwendig ist. Bei Bewegungsgewinden ist Kenntnis der Reibverhältnisse für die Bestimmung des erforderlichen Antriebsmomentes entscheidend. Im konkreten Fall ist es für die Reibverhältnisse bei der Stahlspindel entscheidend, da man sich im Grenzgebiet der Selbsthemmung befindet. Das heißt unter gewissen Bedingungen, wie Fertigungstoleranzen, Temperaturen und Luftfeuchtigkeit kann das Eigengewicht der Spindel (als Kraft F_L) ausreichen, dass sich die Spindel selbsttätig verdreht. Da im vorliegenden Fall eine genaue Ermittlung aufgrund diverser Einflussfaktoren schwer möglich ist, wurde das Moment mit einem Sicherheitsfaktor zusätzlich zur Reibung behaftet. Für die genaue Ermittlung und Wirkungsgradberechnung wird auf die einschlägige Literatur [19] verwiesen.

3.2 Grundlagen zu den Systemen

Unter diesem Punkt werden Systemeigenschaften und Merkmale der Produkte erklärt.

3.2.1 Inline-Antriebslayout

Das Inline-Antriebslayout ist durch eine Drehmomentübertragung in Längsachse charakterisiert, wie es in Abbildung 3-6 dargestellt ist. Außerdem wird angemerkt, dass in dieser Arbeit beim Inline-Layout von einem koaxialen Kraftfluss ausgegangen wird. Der Vorteil dieses Antriebslayouts liegt in der schmalen Bauweise mit einem Durchmesser von 40 mm und der daraus resultierenden Gestaltungsfreiheit für den Kunden.

Vergleichsweise ist in Abbildung 3-7 eine Antriebseinheit in einer 90° Winkelbauweise gezeigt. Dabei erfolgt eine Drehmomentübertragung in einem rechten Winkel. Dieses Antriebslayout mit einem Schraubradgetriebe befindet sich nicht in der Produktpalette von LOGICDATA (siehe Abbildung 1-4). Vorteile dieser Variante ergeben sich aus der geringeren Bauhöhe und einem geringeren Geräuschniveau, welches hauptsächlich aus den beiden Stufen des Planetengetriebes bei den Inline-Antrieben resultiert.



Abbildung 3-6: Inline-Antriebslayout (LOGICDATA)



Abbildung 3-7: 90°-Antriebslayout in Winkelbauweise (LINAK) [20]

Der Vollständigkeit halber ist zum Vergleich in Abbildung 3-8 ein Antrieb gezeigt, der kein koaxiales Antriebslayout aufweist sondern in einer 180°-Winkelbauweise ausgeführt ist und lediglich eine single-stage Variante abbildet.



Abbildung 3-8: Single-stage Antrieb in nicht koaxialer Bauweise (KETTERER) [21]

3.2.2 Single-stage und dual-stage Antriebseinheiten

Wie eingangs beschrieben, bietet LOGICDATA zwei unterschiedliche Arten von Inline Antrieben an, die als single-stage und dual-stage bezeichnet werden. Der single-stage Antrieb SLIMdrive-500, mit nur einer Stahlspindel zur Verstellung, deckt das untere Preissegment ab und ist für ein Zwei-Säulensystem konzipiert. Dieser weist einen geringeren Verstellhub bei einer größeren Einbaulänge auf. Die dual-stage Antriebe SLIMdrive-660s und LOGICdrive-660 besitzen ein synchrones Zwei-Spindelssystem zur Höhenverstellung. Der Vorteil liegt in der geringen Einbaulänge bei gleichzeitig größeren Verstellhüben.

Dadurch wird ein großer Teil der Märkte mit den unterschiedlichen Höhenanforderungen abgedeckt. Abbildung 3-9 zeigt das System unter Anwendung einer Hohl- und Stahlspindel. Aufgrund der Synchronverstellung besitzen beide Spindeln dieselbe Steigung. In dieser Arbeit werden ausschließlich die dual-stage Antriebe mit deren Schnittstellen behandelt.

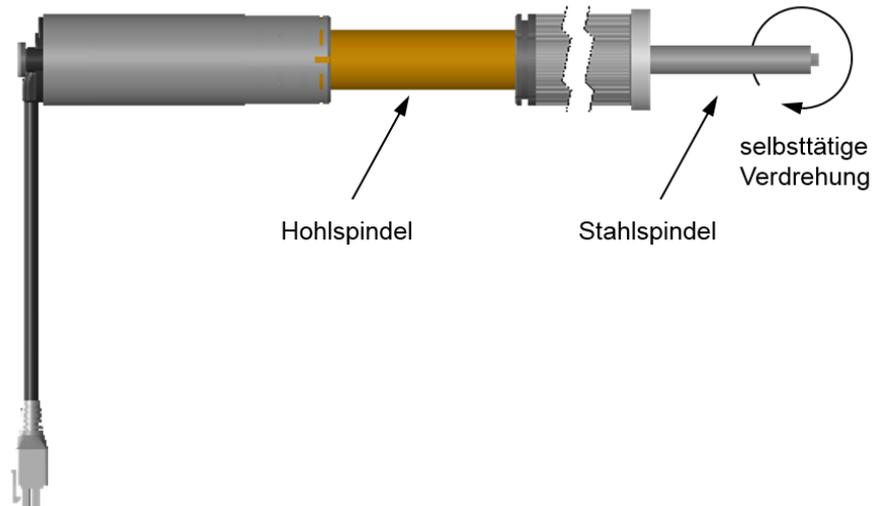


Abbildung 3-9: Dual-stage Antrieb SLIMdrive-660s mit Synchronverstellung der Hohl- und Stahlspindel

Abhängig vom Kunden und deshalb auch vom Markt werden unterschiedliche Längen gefordert. Um die Variantenvielfalt der Antriebe und Spindeln so gering wie möglich zu halten, werden die dual-stage Antriebe in einer Länge angeboten und die unterschiedlichen Längen mit Adaptern ausgeglichen. Ein Vergleich der Einbaulänge zwischen dem SLIMdrive-500 und SLIMdrive-660s findet sich in Anhang 1.

3.2.3 Thick-End-Down und Thick-End-Up Design

Wie zu Beginn erwähnt, wird bei den Tischsäulensystemen zwischen dem Thick-End-Up und dem Thick-End-Down Design unterschieden. Diese beiden Varianten unterscheiden sich grundlegend in der Anbindungssituation (siehe Abbildung 3-10). Das Außenrohr wird bei der TED Variante unten am Tischfuß montiert, wogegen bei der TEU Variante das Innenrohr am Tischfuß befestigt wird. Der Motor wird oben entweder beim Innenrohr in der TED Variante oder beim Außenrohr in der TEU Variante montiert. Für die Mittenrohrmitnahme der Variante mit dem Außenrohr unten wird auf die Hohlspindel ein Mittenrohradapter geklippt und mit dem Mittenrohr befestigt. Bei der Variante mit dem Außenrohr oben wird oberhalb in das Innenrohr ein so genannter Tube-Adapter auf den Motor geklippt, welcher ein synchrones Bewegen des Mittenrohrs zur Folge hat.

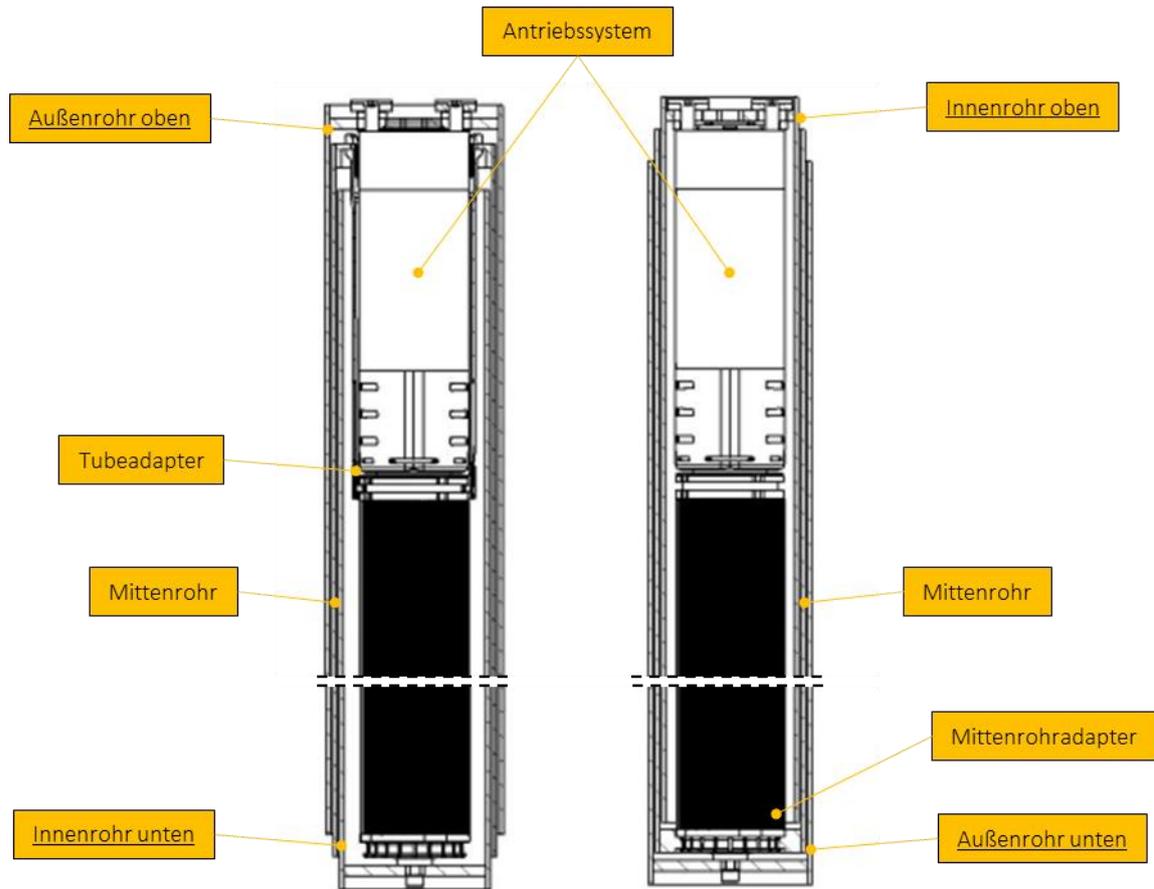


Abbildung 3-10: Dual-stage Antriebe in der Säule eingebaut im eingefahrenen Zustand; links in Thick-End-Up und rechts in Thick-End-Down

3.3 Anforderungen an Drop&Drive

Unter Drop&Drive versteht man eine einfache Montage eines Antriebes in der Säule im Rahmen der Montage beim Kundenprodukt. Per Definition ist die Antriebseinheit so einfach wie möglich zu halten. Im besten Fall ermöglicht dies eine werkzeuglose Montage. Die Montage ist dabei von den drei Schnittstellen Mittenrohranbindung, Stahlspindel und Motoranbindung abhängig.

Auszug aus dem Lastenheft als Anforderung:

Die Anforderungen an das Gesamtsystem Drop&Drive sind stets eine einfache und sichere Montage sowie eine sichere Funktion im Betrieb zu gewährleisten. Als Drop&Drive versteht man die Montagemöglichkeit, Antriebe in das Säulensystem von oben einbauen zu können und anschließend formschlüssig mit einer Schraube zu sichern. Mit dem derzeitigen Anbindungsstandard ist dieser Einbauprozess nicht gegeben.

3.3.1 Stahlspindelanbindung

Für den letzten Schritt bei der Assemblierung muss der Sechskant mit den Flanken zur Sechskantlochbohrung in der Säule bereits ausgerichtet sein, um einen Zusammenbau zu ermöglichen. Ist das nicht der Fall, so muss ein erneutes Auseinanderbauen erfolgen, da ein nachträgliches Verdrehen schwer möglich ist. In Abbildung 3-11 ist die Anbindung mit dem Sechskantsystem gezeigt.

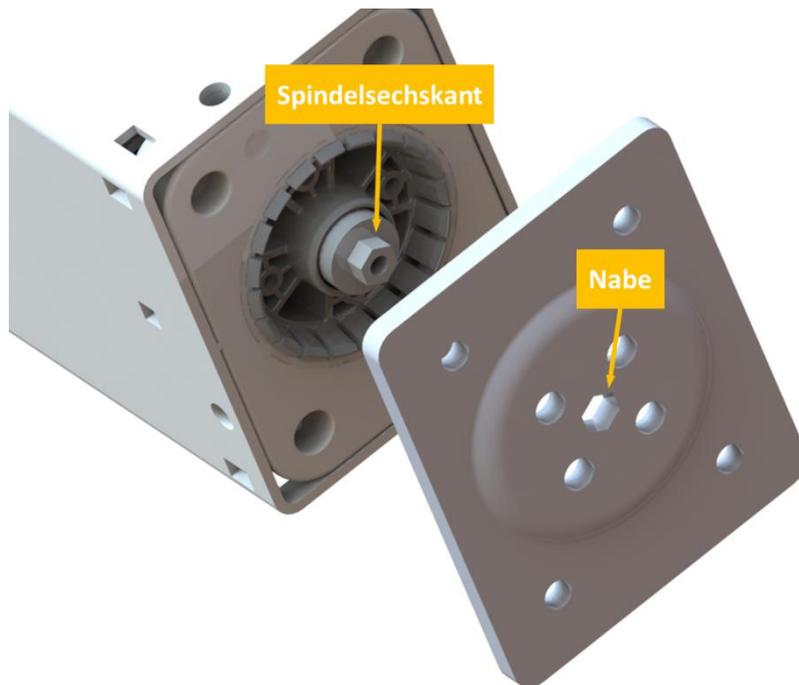


Abbildung 3-11: System mit Sechskantspindel und Nabe

3.3.1.1 Inkrementelle Verstellung

Die inkrementelle Verstellung der Spindel basiert auf deren Geometrie sowie der Geometrie der Naben. In Abbildung 3-12 ist bildhaft die Winkelteilung für den derzeitigen Sechskant in der Spindel gezeigt.

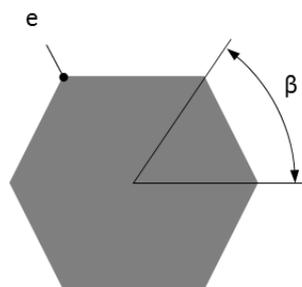


Abbildung 3-12: Winkelteilung für Positionierung

Für beliebige Geometrien kann somit ein Teilungswinkel aus Formel (3-7) ermittelt werden.

$$\beta = \frac{360}{e} \quad (3-7)$$

- e Einrastpunkte
- β Teilungswinkel [°]

Beim Sechskant ergibt sich somit ein Teilungswinkel von 60°. Dieser könnte beispielsweise durch eine zwölfkige Nabenbohrung auf 30° reduziert werden. Eine nicht inkrementelle Verbindung wäre somit unabhängig vom Positionierungswinkel.

3.3.1.2 Bauraumanforderungen

Die definierten Anforderungen an die Stahlspindel sind im Folgenden zusammengefasst:

An axialem Bauraum stehen insgesamt acht Millimeter zur Verfügung (Abbildung 3-13). Das heißt wie dargestellt, dass die maximale axiale Länge mit einem Anschlusssystem, wie hier der Kopf der M6 Innensechskantschraube des bestehenden Systems, nicht überschritten werden darf. Die Plattenstärke der Säule ist mit vier Millimeter und die Länge des Sechskants ist mit dreieinhalb Millimeter vorgegeben.

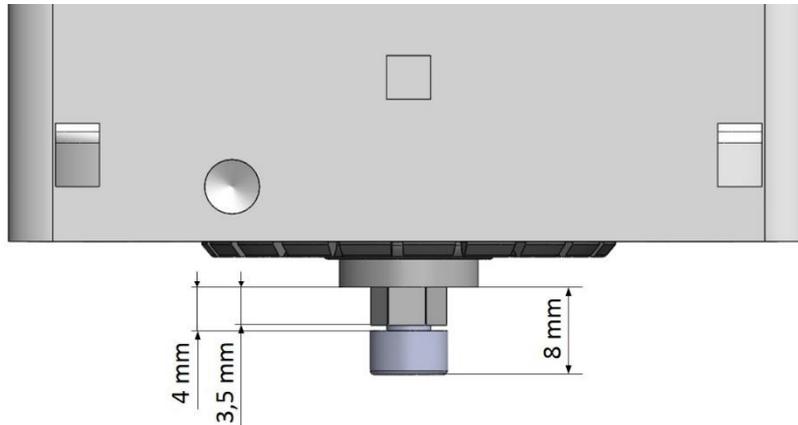


Abbildung 3-13: Bauraumanforderung an die Stahlspindelanbindung

Als unkritischer wird dabei der radiale Platzbedarf bei der Platte angesehen. Hier besteht die Einschränkung in der noch möglichen Montage der Tischbeine mittels Schrauben im Säulenboden gemäß dem derzeitigen Bohrbild. Wogegen der radiale Bauraum der Spindel am Ende kleiner oder gleich dem Spindeldurchmesser von 12,5 mm mit Gewinde entsprechen muss. An die Verbindung wird die Forderung gestellt, dass die Platte der Säule mit einer Laserbearbeitung hergestellt werden kann. Im Idealfall soll es eine lösbare Verbindung sein, was jedoch nicht als ein Muss-Kriterium gewertet wird.

3.3.2 Transportsicherung

Um eine schadlose Synchronverstellung zu gewährleisten, wird für beide Spindeln eine geforderte Längeneinstellung gefordert, wie dies unter 1.1.2.2 und 1.1.2.3 bereits erläutert wurde. Außerdem ist wie zuvor beschrieben für die Stahlspindelbefestigung eine genaue Ausrichtung des Sechskants vor der Montage notwendig. Aufgrund des nicht selbsthemmenden Stahlspindel-systems ist eine selbsttätige Verstellung der Spindel die Folge, was für den Kunden einen Mehraufwand beim Assemblieren bedeutet. Als Anbindung der Stahlspindel wird für den Run-In- und End-of-Line- Test eine Schnittstelle gefordert, die ein einfaches und schnelles Einsetzen eines Antriebes in den Prüfstand ermöglicht. Bezüglich der Transportsicherung wird bei den Tests über zehn Zyklen gefordert, dass danach keine Beeinträchtigung in der geforderten Funktion der Spindelbremse festzustellen ist.

3.3.3 Mittenrohranbindung

Die Anbindung beim Mittenrohr beinhaltet eine Lagerstelle, da sich das Mittenrohr des Antriebes für die Hubbewegung dreht und der Adapter fest mit dem mittleren Säulenrohr verbunden ist. Der Mittenrohradapter wird in dieser genannten Ausführung nur für die TED Variante benötigt. Für die Variante TEU gibt es einen anderen Adapter, welcher auf der oberen Seite des Motors befestigt wird. Bei diesem System besteht kein Überarbeitungsbedarf. Hingegen war die Notwendigkeit der Überarbeitung beim erstgenannten System groß, da die Prozesssicherheit für die Montage beim Mittenrohr nicht gegeben war. Konkret wird der Mittenrohradapter in der Säule an jeder Seite mit einem Kunststoff-Pin fixiert, die hier zusätzlich als Gleiter zwischen den Rohren dienen (siehe Abbildung 3-14 und Abbildung 3-15).



Abbildung 3-14: Ursprünglicher Mittenrohradapter



Abbildung 3-15: Antrieb mit Mittenrohradapter in der Säule verclippt

Dieser Adapter wird vor der Antriebsmontage in der Säule befestigt. Zum Zeitpunkt der Antriebsmontage sind das innere und mittlere Säulenrohr zusammengebaut. Der Antrieb wird dann von oben in die Säulen gegeben und unter Kraftaufwendung mit dem Mittenrohradapter verclippt. Das Problem hierbei war die nicht zu gewährleistende Prozesssicherheit durch Versagen der axialen Schnapper, was im schlimmsten Fall zur Zerstörung des gesamten Antriebes führte. Die Vorgabe der engen Toleranzen für diese Schnappverbindung, die von den Kunden nicht erfüllt werden konnte, und ebenso die geforderte Bedingung der Schmierung führten zu diesem Problem.

3.3.4 Motoranbindung

Der Motor wird über zwei Schrauben mit einer dazwischen gelegten Dämpfungsplatte mit der Säulenplatte verbunden. Dies ist zwar keine optimale Drop&Drive Lösung, erweist sich jedoch als einfach und sicher, weshalb der Bedarf für die Entwicklung einer neuen Schnittstelle derzeit nicht gegeben ist und die anderen Schnittstellen Vorrang haben. Eine detailliertere Beschreibung findet unter 4.2.3.2 statt.

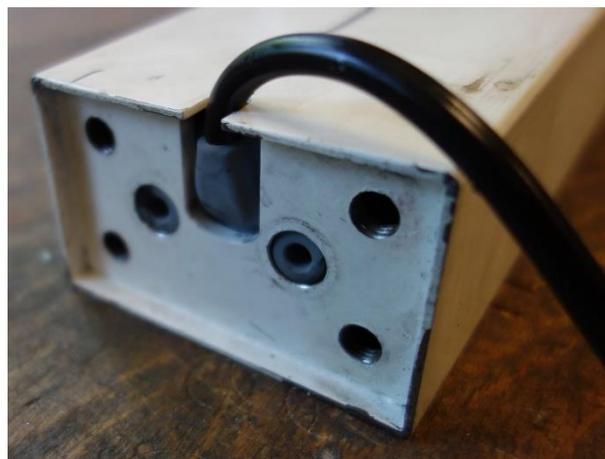


Abbildung 3-16: Antrieb für Thick-End-Up Montage

3.4 Test- und Versuchsanforderungen

Um zu verifizieren, ob die Spezifikationen erfüllt werden, ist es notwendig entsprechende sowie normgerechte Versuche mit Prototypen durchzuführen. Entscheidend sind dafür im Vorhinein vereinheitlichte Versuchsbedingungen, die eine ausreichend hohe Reproduzierbarkeit gewährleisten. Prinzipiell werden Versuche in Tests als Gesamtsystem (Tisch mit Tischbeinen und eingebauten Antrieben) sowie Tests mit Säulen und eingebauten Antrieben unterteilt. Übergeordnet gibt es zusätzlich eine Einteilung in dynamische und statische Tests. Dynamische Tests sowie Tests als Gesamtsystem und eingebaute Antriebe in den Säulen werden grundsätzlich mit Prototypen höheren Detaillierungsgrades hin zur Serienreife durchgeführt, weshalb diese hier nicht angewendet werden.

3.4.1 Test als Einzelsystem

Als Einzelsystem versteht man die Prüfung an einzelnen Bauteilen, Baugruppen oder zusammengesetzten Systemen, jedoch kein gesamtes Tischsystem. In dem Zusammenhang spricht man von der Schnittstelle selbst oder vom Säulensystem.

3.4.1.1 Testscenario der Stahlspindel

Bei Prototypen im Anfangsstadium wird hinsichtlich der Spezifikationserfüllung des Assemblings, der Kraft- und Drehmomentabstützung ausschließlich dieser Test durchgeführt. Es geht primär um die Einschätzung von Potentialen bei den Konzepten hinsichtlich der zu erfüllenden Anforderungen sowie der Einschätzung einer Über- beziehungsweise Unterdimensionierung.

Wie unter 3.1.1 erwähnt, sind folgende Spezifikationen für die Stahlspindelanbindung in Tabelle 3-1 aufgelistet:

Tabelle 3-1: Anforderungen an die Stahlspindelanbindung

Anforderungen Stahlspindelanbindung	
Drehmoment	3 Nm
Druckkraft	1200 N
Zugkraft	500 N

3.4.1.2 Testscenario der Transportsicherung

Bei der Transportsicherung sieht der Test vor Auslieferung folgend aus, dass das dafür benötigte Moment zum Verdrehen der Stahlspindel gemessen wird. Dieser Test wird mehrmals durchgeführt, und anschließend werden die gemessenen Momente verglichen, um eine Tendenz feststellen zu können. Dieser Test kann bei Systemen, die nur bis zur erstmaligen Aktivierung funktionieren, wie beispielsweise eine Klebeverbindung, nicht durchgeführt werden.

3.4.1.3 Testscenario als Säuleneinheit nach LOGICDATA Spezifikation

Hierbei wird ein Falltest auf einem Betonboden durchgeführt. Ein in einer Säule verbauter Antrieb wird aus vertikaler Richtung über die x-Achse sowie über die y-Achse umgestoßen, wie es in Abbildung 3-17 dargestellt ist. Gefordert werden zwei schadlos überstandene Stürze.

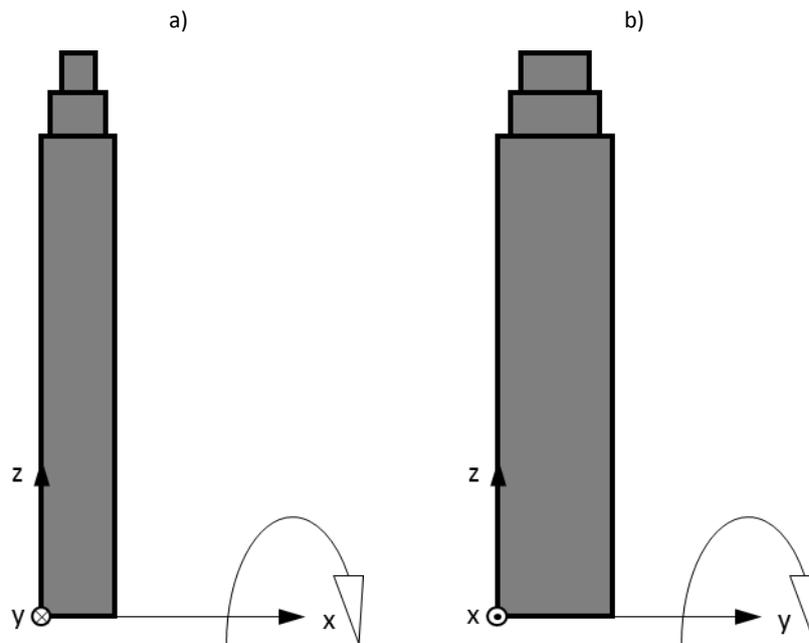


Abbildung 3-17: Statischer Falltest
a) x-Achse
b) y-Achse

3.4.2 Test als Gesamtsystem

Für die Fixierung der Stahlspindel gibt es keine spezifizierten Testanforderungen. Die Anforderungen richten sich nach dem End-of-Line Test sowie dem Run-In Test. Das heißt das Antriebssystem wird nach der Endmontage geprüft, indem der Antrieb in eine entsprechende Testvorrichtung eingespannt wird und mehrmals eine Auf- und Abfahrt durchführt. Der Antrieb wird dabei an der Motorseite als auch mit dem Sechskant der Stahlspindel in einer Vorrichtung eingespannt. Nach erfolgreicher Absolvierung werden die beiden Spindeln in der spezifizierten Länge (Abbildung 1-12 und Abbildung 1-13) für die Auslieferung eingestellt. Für manche Kunden wird dabei die Stahlspindel auf spezielle Weise fixiert, damit es zu keiner nachfolgenden Verdrehung kommen kann. Entweder erfolgt die Fixierung über einen Klebepunkt oder über ein Teflonband, das auf das Spindelgewinde aufgewickelt wird und somit für ein Verklemmen sorgt. Je nach Konzept verläuft der Test so, dass die Fahrten der beiden beschriebenen Tests mit dem Antrieb gemacht werden. Abhängig vom Konzept darf die Stahlspindel mit der Hemmung vorher sowie nachher nur eine begrenzte Stromaufnahme verursachen, die in einem erlaubten Bereich liegt und auch nach mehrmaligem Fahren ein Selbsthemmen für die eingestellte Spindel gewährleisten würde. Anschließend findet der Einbau in eine Säule statt, wo die Einbausituation geprüft werden kann und anschließend ein Test des Tischbeines mit dem Antrieb im Säulensystem stattfindet. Der Run-In und End-of-Line Test sind Maßnahmen zur Qualitätssicherung der Antriebe. So werden beim Run-In Test zehn Testzyklen mit jeweils Auf- und Abfahren durchlaufen, was eine optimale Schmierfettverteilung zur Folge hat. Zusätzlich wird beim End-of-Line Test die Stromaufnahme über den Hub und die Zyklen gemessen.

3.4.2.1 Testscenario nach US-Norm (ANSI/BIFMA X5.5-2014)

Unter dem amerikanischen Teststandard wird ein Tischsystem, bestehend aus zwei Säulen, Rahmen und Tischplatte, in die Mittenposition der Gesamthubhöhe gefahren. Anschließend wird der Tisch an der schmalen Seite mit dem Tischbein auf eine definierte Höhe gehoben und dann von dieser Höhe fallen gelassen. Die Höhe hängt dabei vom Gewicht des Tisches ab, wie in Tabelle 3-2 kategorisiert.

Tabelle 3-2: Fallhöhe nach Gewichtsklasse gemäß US-Norm [22, p. 50]

Eigengewicht Tisch m in [kg]	Fallhöhe h in [mm]
$m < 45 \text{ kg}$	180 mm
$45 \leq m \leq 90 \text{ kg}$	120 mm
$90 < m \leq 136 \text{ kg}$	60 mm
$m > 136 \text{ kg}$	n/a

Der Test wird für beide Tischbeine zweimal wiederholt. Nach der erfolgten Sichtprüfung nach dem Test muss der Antrieb funktionsfähig, und die Anbindungen an Motor, Mittenrohr und Stahlspindel müssen intakt sein, um den Standard zu erfüllen.

Als Erweiterung des Tests findet bei LOGICDATA eine anschließende Ermittlung des Sicherheitsfaktors statt. Dabei wird der Tisch von der Nominalhöhe des Wertes in der Tabelle mit einer um 20%ig gesteigerten Fallhöhe getestet. Dies erfolgt mit denselben Wiederholversuchen und Analysen, um schlussendlich einen zusätzlichen Sicherheitsfaktor gegenüber der Norm bestimmen zu können.

3.4.2.2 Testszenario nach EN 527-3

Bei dem Testszenario nach der europäischen Norm EN 527-3 wird der Tisch auf eine Höhe von 720 mm ausgefahren. Die Fallhöhe ergibt sich dabei nach Ermittlung der Hubkraft pro Seite gemäß der Berechnung in Tabelle 3-3.

Tabelle 3-3: Ermittlung der Fallhöhe nach EN 527-3 [23, p. 10]

Hubkraft einseitig F_H in [N]	Fallhöhe h in [mm]
$0 \leq F_H \leq 200 \text{ N}$	100 mm
$200 \text{ N} < F_H < 400 \text{ N}$	$170 - 0,35 \times F_H$
$F_H \geq 400 \text{ N}$	30 mm

Der Test sieht eine fünfmalige Versuchsdurchführung pro Seite vor. Anschließend werden die beiden Antriebe aus den Säulen ausgebaut und auf Schäden untersucht. Wenn keine sichtbaren Schäden vorliegen und die Funktionstüchtigkeit gegeben ist, wird der Test als positiv gewertet. Wie beim Test nach der US-Norm wird auch hier der Tisch an der schmalen Seite angehoben und anschließend, wie in Abbildung 3-18 dargestellt, fallen gelassen.

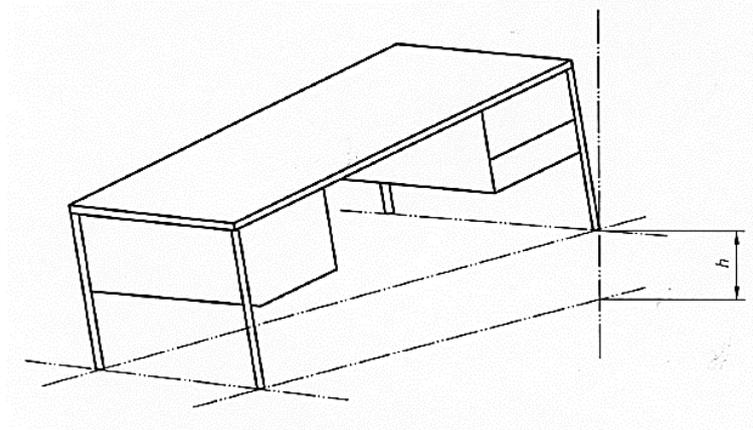


Abbildung 3-18: Fallprüfung nach der europäischen Norm [23, p. 11]

Zusätzlich zu diesem Testszenario wird, wie unter dem US-Standard bereits beschrieben, ein erweiterter Test durchgeführt, um den Sicherheitsfaktor gegenüber der Norm ermitteln zu können. Dabei wird dieser Test nach EU-Standard mit einer um 20 % gesteigerten Fallhöhe durchgeführt, wenn dieser zuvor mit der geforderten Fallhöhe bestanden wurde. Nach fünfmaligem Versuch pro Seite werden die Antriebe wieder analysiert. Die Steigerung um 20 % gegenüber der jeweils vorherigen Fallhöhe wird dementsprechend oft durchgeführt, bis es zu einer Schädigung kommt. Zudem werden hierfür zwei Tischsysteme für eine Prüfung herangezogen.

4 Ist-Analyse zum Stand der Technik

Um die Motivation einer Verbesserung des bestehenden Systems zu untermauern, wurden zu Beginn nahezu alle relevanten Systeme, seien es Kunden- oder Konkurrenzprodukte, einer Benchmarkanalyse unterworfen. Basierend auf dieser Gliederung wird bei der folgenden Analyse die Anbindung der jeweiligen Hersteller bewertet. Dies soll nochmals Aufschluss über die derzeitige praktische Situation der Anbindung des Antriebes und der Sicherung der Stahlspindel geben.

4.1 Systeme am Markt

Aus dem genannten Analyseverfahren zeichnen sich für die Stahlspindelanbindung im Groben drei verschiedene Anbindungstypen ab:

1. Vielzahnverbindung
2. Kegolverbindung
3. Sechskant mit/ohne Adapter

Der Anbindungstyp mit einem Vielzahnprofil wird ohne Adapter zwischen Stahlspindel und Säule verwendet. Als weitere Stahlspindelanbindung fungiert eine Kegolverbindung ohne jegliche Adapter. Der dritte Anbindungstyp ist der Sechskant von LOGICDATA, der entweder direkt ohne Adapter oder mit Adapter Anwendung findet.

Bezüglich der Transportsicherung konnte bei keinem System am Markt ein Bauteil für eine solche Funktion erkannt werden. Hier wird ausschließlich bei den Antrieben von LOGICDATA eine kundenabhängige Fixierung eingesetzt. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Systeme mit deren Eigenschaften erläutert.

4.1.1 Benchmarkanalyse

Für die Wettbewerbsanalyse wurden Säulen mit eingebauten Antrieben herangezogen. Hintergrund dafür war die Gewinnung von Erkenntnissen für den Assemblierungs- beziehungsweise de-Assemblierungsprozess. Die folgenden Bilder sollen ein Verständnis über die Montagebedingungen der jeweiligen Systeme und die derzeitige Variantenvielfalt geben.

4.1.1.1 System mit LOGICDATA Antrieb ohne Adapter

Das gezeigte System in Abbildung 4-1 mit einem SLIMdrive-660s Antrieb von LOGICDATA wird ohne Adapter verwendet und somit die Sechskantspindel mit der Säule als Nabe verbunden.



Abbildung 4-1: Antrieb mit Sechskantverbindung ohne Adapter

4.1.1.2 System mit LOGICDATA Antrieb mit Adapter

Das in Abbildung 4-2 gezeigte System verwendet ebenfalls einen SLIMdrive-660s Antrieb mit einem zusätzlichen Adapter.



Abbildung 4-2: Säulensystem mit Adapter zur Längenanpassung und Montageerleichterung

Die Anbindung der Spindel erfolgt über einen Adapter, der auf den Sechskant der Stahlspindel geschraubt wird und über sechs Gewindebohrungen am unteren Ende auf den Säulenboden montiert wird. Der Adapter wird dabei in unterschiedlichen Längen angeboten. Die Befestigung erfolgt über zwei Langlochbohrungen mit dem Spindeladapter in der Säule. Es ergibt sich dabei ein Vorteil durch die winkelunabhängige Positionierung bei der Montage.

Im Gegensatz zum vorhin gezeigten System für den europäischen Markt unterscheidet sich das System für den amerikanischen Markt vor allem durch die Einbauhöhe, was bei diesem Modell in Form des Säulendesigns und des Adapters erkennbar ist (Abbildung 4-3). Hier ist bei der unteren Säule ein Bügel für die Stahlspindelbefestigung mittels eines Adapters angebracht. Dies ermöglicht einen Bauraumgewinn, da ein Teil der Stahlspindel im Tischfuß versenkt wird. Der Adapter wird auf den Sechskantflansch der Stahlspindel geschraubt und über zwei Schrauben mit dem Rohr über die Langlochbohrungen befestigt. Dabei macht man sich den gleichen Vorteil der Montage des vorigen Systems zu Nutze, wo man durch eine durchdachte Geometrieanpassung der Welle und Nabe eine nicht inkrementelle Verstellung hervorruft.



Abbildung 4-3: Säulensystem mit optimierter Einbaulänge

Eine weitere und ähnliche Anbindung der Stahlspindel findet in Abbildung 4-4 Anwendung. Hier wird beim gezeigten Modell ein Adapter verwendet, welcher eine einfachere Montage bei nahezu gleicher Einbaulänge ermöglichen soll. Im Vergleich zu den beiden Systemen zuvor wird hier der Adapter über zwei Löcher in der Säule mit dem Adapter verbunden, was einer genaueren Positionsausrichtung bedarf. Im Vergleich zum standardmäßigen Sechskant ergibt sich eine geringfügig bessere Montierbarkeit, da die nachträgliche Ausrichtung für die Befestigung in der Säule einfacher möglich ist als das Verdrehen der Spindel über den rudimentären Sechskant. Angemerkt sei, dass dieses Produkt ebenfalls für den europäischen Markt ist.



Abbildung 4-4: Spindelanbindungssystem für eine einfachere Montage am europäischen Markt

Diese in Abbildung 4-5 gezeigte Variante eines Adapters als Verlängerungsstück wird in der TEU Säulenvariante verbaut. Das erhöht die Einbaulänge und soll vor allem Vorteile bei der automatisierten Montage bringen. Der Gussadapter wird dabei auf den Sechskant der Stahlspindel geschraubt und über eine M8 Schraube in radialer Richtung reibschlüssig mit der Säule verbunden. Aufgrund der nicht vorhandenen Selbsthemmung der Stahlspindel und den jeweils eingesetzten Rechtsgewinden ergaben sich neue Herausforderungen hinsichtlich des Montageprozesses. Da die Reibung des M8 Gewindes der Säulen-Spindelverbindung größer ist als die des Bewegungsgewindes, kommt es zu einem unerwünschten Verdrehen der Spindel mit einem einhergehenden erschwerten Montageaufwand. Um dies zu umgehen, wird die M8 Schraube mit einer hohen (Anfangs-) Drehzahl in den Adapter geschraubt, um die Trägheit der Bewegungsspindel zu nutzen und eventuell auch die Axialkraft mit der Stirnreibung zwischen dem Adapter und der Säulenplatte. Diese Problematik kann über die unter 3.1.2 (Gewindekenngrößen und Kräftesituation an Bewegungsgewinden) erläuterten Gewindegrundlagen erklärt werden.



Abbildung 4-5: Spindelanbindung mit Adapter für eine automatisierte Montage

Ausschließlich hier kommt ein Heißklebepunkt zwischen Adapter und Kunststoffspindelmutter zur Anwendung, um die Transportsicherung herzustellen (gezeigt in Abbildung 4-9).

4.1.1.3 Systeme ohne LOGICDATA Antriebe

Unter dieser Kategorie werden Systeme eingeteilt, die entweder keine LOGICDATA Produkte oder nur Steuerung und Handschalter als Komponenten von LOGICDATA verwenden.

Die in Abbildung 4-6 gezeigte Einheit enthält keinen LOGICDATA Antrieb, jedoch sind Steuerungen und Handschalter teilweise von LOGICDATA verbaut. Beim Antrieb handelt es sich um keinen konventionellen Antrieb, sondern um einen Bandantrieb in Verbindung mit einer Spindel. Hierbei werden über ein Getriebe zwei Stahlbänder zur Verstellung betätigt. Bei der Anbindung an die Säule werden zwei Blechholme verwendet, die mit Laschen in die Schlitze der Platte gesteckt und anschließend plastisch verformt werden, um einen Formschluss herzustellen. Als „Poka Yoke“, also Fehlervermeidung, werden vier Schlitze im Säulenboden verwendet, um die Ausrichtung des Antriebes beim Einbau einfacher zu gestalten. Die vier Bohrungen können zur Verwendung als Gleichteilstrategie zur Variantenreduktion beitragen. Diese Lösung wird als kostengünstig gesehen, da keine zusätzlichen Bauteile benötigt werden. Andererseits wird die Montierbarkeit als komplizierter eingestuft als die zuvor vorgestellten Systeme, da es weder eine Zentrierung noch eine Möglichkeit zur Positionsfindung gibt und diese Laschen beim Einbau mit den Bohrungen fluchten müssen. Insgesamt ist für das System hinsichtlich der Montage kaum ein Vorteil gegenüber dem Sechskantsystem von LOGICDATA zu erkennen.

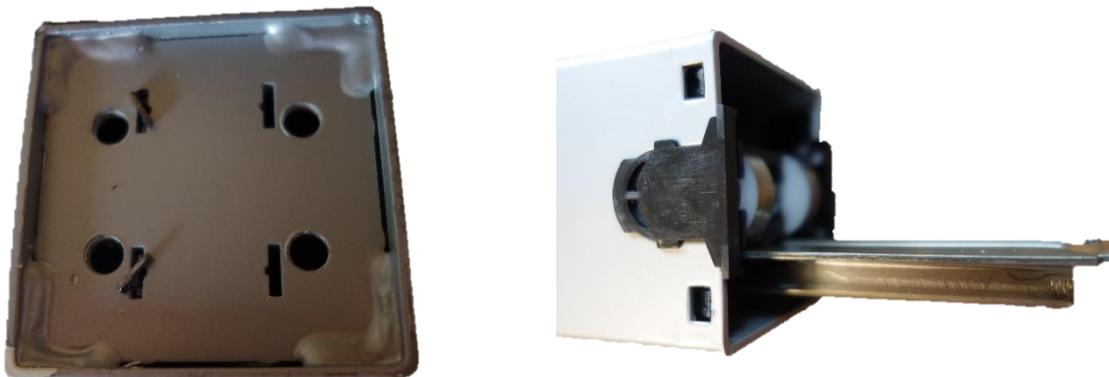


Abbildung 4-6: Stahlspindelanbindung mit Bandantrieb

In Abbildung 4-7 ist eine Anbindungsvariante mit einer Kontur eines Vielzahns gezeigt. Beim de-Assemblieren des Antriebes und der Säule ist die nicht vorhandene Selbsthemmung der Stahlspindel aufgefallen. Es konnte bei dieser neuen Säule keine Verdrehsicherung der Stahlspindel erkannt werden. Als Verbindungselement zwischen Stahlspindel und Säulenboden kommt eine Vielzahn-/Rändelverbindung zum Einsatz. Die Besonderheit dieser Verbindung liegt in der optimierten Form der Welle-Nabe-Ausführung, wo die Welle am Ende der Verzahnung eine große Fase aufweist. Der durchgeführte Assemblierungsprozess zeigte trotz der inkrementellen Positionierung eine einfache Montage, wodurch das Selbsthemmungsproblem der Stahlspindel bei der Montage nicht weiter von Relevanz schien. Die axiale Sicherung dieser torsional formschlüssigen Verbindung erfolgt mit einer Schraube an der Stirnseite.

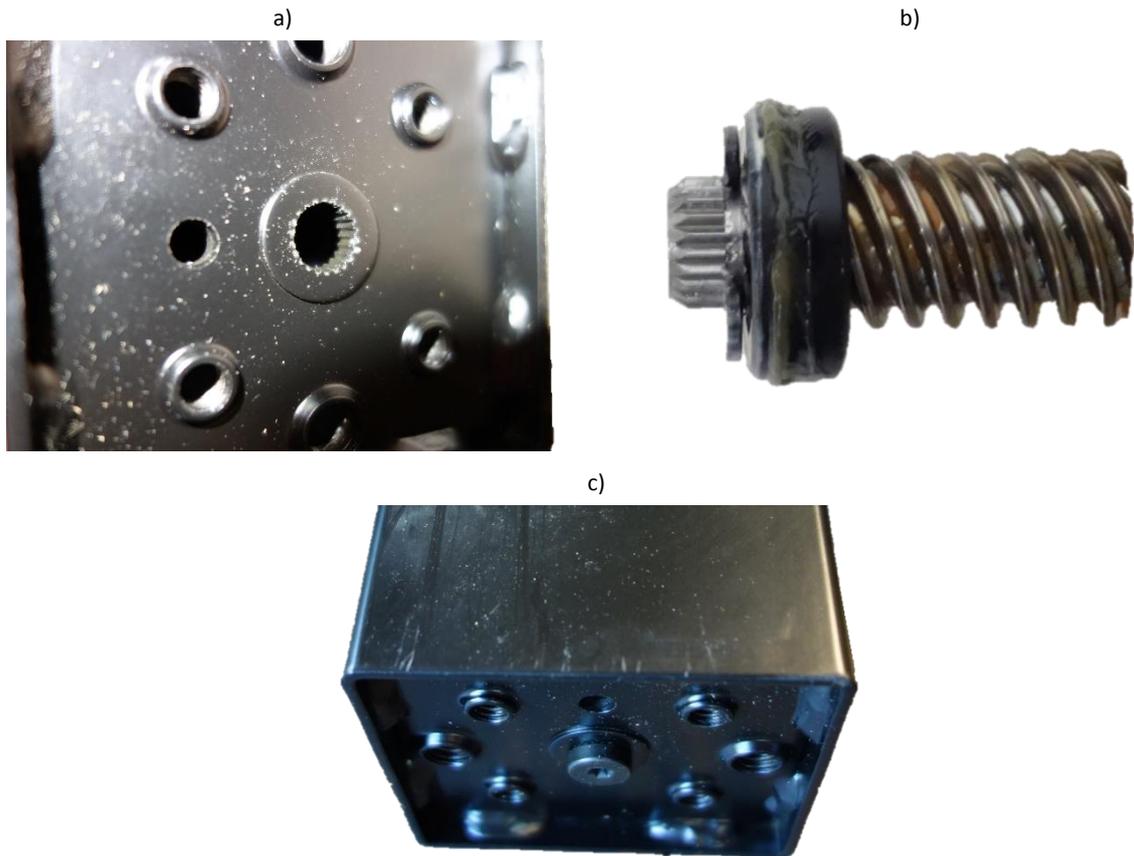


Abbildung 4-7: Spindelanbindung mittels Vielzahnverbindung
a) Nabe Vielzahn in der Säule
b) Spindel Vielzahn
c) Assemblierter Zustand

Bei folgendem Antrieb am Markt konnte eine nicht selbsttätig verstellbare Stahlspindel erkannt werden, was auf eine vorliegende Selbsthemmung deuten könnte oder auf eine erhöhte Reibung im Gewinde zurückzuführen ist. Angebunden wird die Stahlspindel in der Säule mittels einer Kegelerbindung. Die Welle als Stahlspindel wird dabei am Ende des Gewindes auf eine konische Form zerspannt. Die Bohrung in der Bodenplatte der Säule weist eine ebenso konische Form auf. Bei dieser radial kraftschlüssigen Verbindung wird eine M8 Innensechskantschraube verwendet. Die Verbindung wird aufgrund der geringen und einfachen Bauteile als kostengünstig eingeschätzt. Lediglich die dreidimensionale konische Bohrung in der Bodenplatte der Säule könnte hier abhängig vom mechanischen Fertigungsverfahren eine Ausnahme bilden. In der Spezifikation der Stahlspindelanbindung seitens LOGICDATA wird für die Entwicklung eine zweidimensionale Geometrie der Bohrung im Säulenboden gefordert. Unabhängig von diesen Spezifikationen sei erwähnt, dass der Montageprozess wegen der guten Zentrierbarkeit und der nicht inkrementellen Positionsfindung als einfach eingestuft werden kann. Zudem erweist sich die bereits erwähnte Selbsthemmung der Stahlspindel für eine einfachere Assemblierung als vorteilhaft.

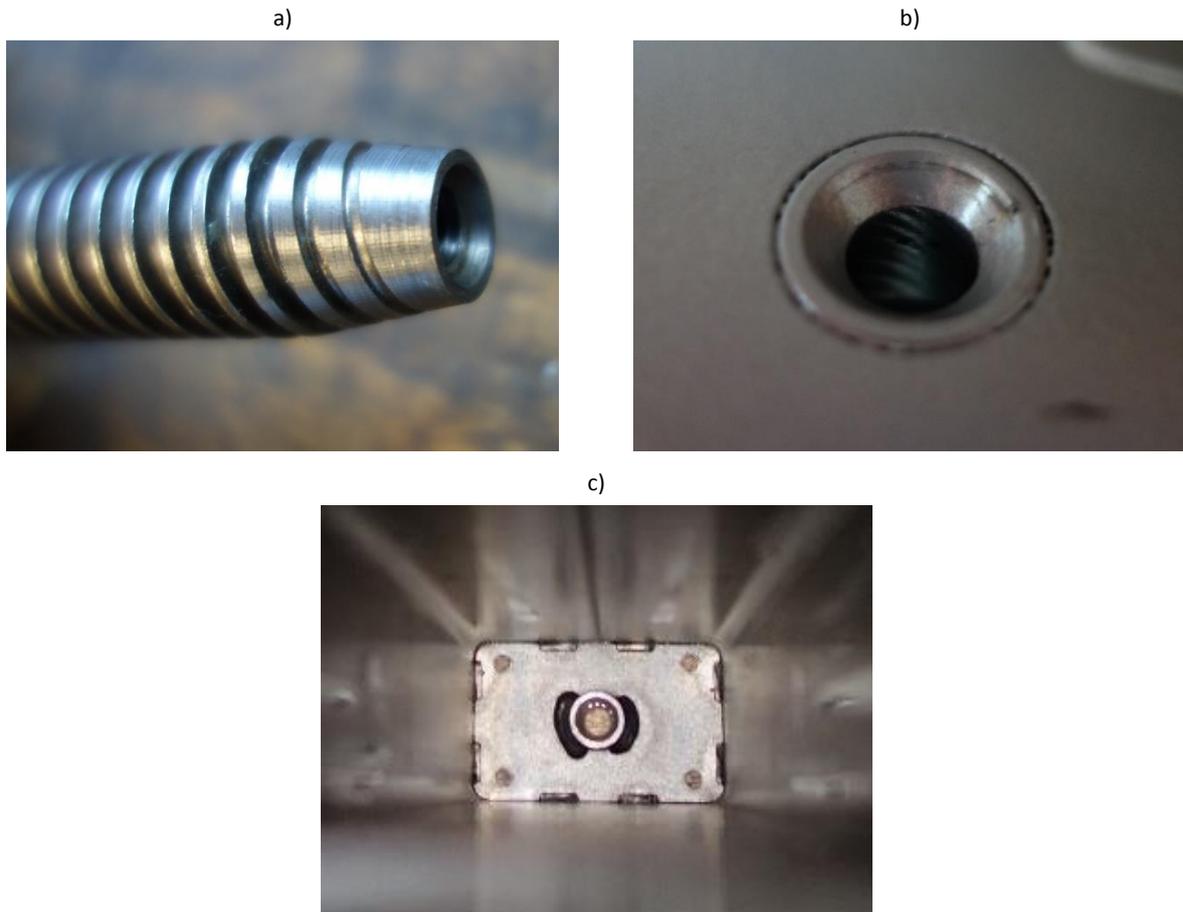


Abbildung 4-8: Spindelanbindung über Kegolverbindung
a) Spindel als Keilwelle
b) Nabe Kegelsitz mit Senkkopfschraube in der Säule
c) Kegelbohrung in der Säule

4.2 Bewertung der Ist-Situation

4.2.1 Stahlspindelanbindung

Das bisherige Stahlspindelanbindungskonzept erfüllt in Wahrheit nicht die notwendigen Kriterien für den gewünschten Zusammenbauprozess. Es besteht die Schwierigkeit in der Ausrichtung des Sechskants der Stahlspindel zur Sechskantbohrung in der Säule. Die Teilung aufgrund der Sechskantausführung von 60° erschwert die Einbausituation, da nur inkrementell möglich. Für einen sicheren Betrieb nach der Montage muss die Spindel eine vorgegebene Längeneinstellung haben, damit der Antrieb aufgrund der Synchronverstellung keinen Schaden nimmt. Zum Verhindern der durch leichte Erschütterungen hervorgerufenen selbsttätigen Verstellung und der einfacheren Montage für den Kunden wurden diverse Maßnahmen unternommen. Die Fixierung erfolgt entweder mit einem Teflonband oder einem Klebepunkt an der Spindelmutter am Ende der Montagelinie. Diese kostenintensive Übergangslösung soll überdacht werden. Durch die vorhin beschriebene inkrementelle Verstellbarkeit in 60° -Schritten kann bei nicht optimal ausgerichteten Flanken eine gleichzeitige Montage, das heißt gleichzeitiges Einschnappen des Antriebes in den Mittenrohradapter sowie Einführung des Sechskants der Spindel in das Sechskantloch der Säule, nicht erfolgen.

4.2.2 Transportsicherung

Derzeit werden zwei verschiedene Versionen für die Transportsicherung realisiert. Beide Arten können erst am Ende der Tests nach der Produktion aufgebracht werden, was hohe Kosten verursacht. Um die

Einstellung richtig vorzunehmen, wird die Spindel in der Länge eingestellt und anschließend mit einem Klebepunkt versehen oder mit einem Teflonband umwickelt (Abbildung 4-9).



Abbildung 4-9: Transportsicherung
a) Heißklebepunkt
b) Teflonband

Die Variante mit dem Heißklebepunkt mit einem Zinkussteil findet nur bei einem Kunden Anwendung. Diese Art des Verklebens mit der Stahlspindel und dem Kunststoff funktioniert aufgrund des gefetteten Zustandes der Stahlspindel nicht.

Für die Fixierungsmethode mit dem Teflonband (Abbildung 4-10) sind vier definierte Schritte beim Aufbringen des Bandes zu befolgen. Zuerst wird die Spindel auf ein definiertes Maß von 40 Millimeter Abstand vom Spindelsechskant zum Spindelmutterende gebracht. Anschließend wird das Teflonband mit drei Umdrehungen um die Spindel gewickelt und die Enden des Bandes in das Gewinde gedrückt. Zuletzt wird die Spindel auf ein Maß von vier Millimeter hineingedreht, um anschließend verpackt werden zu können.

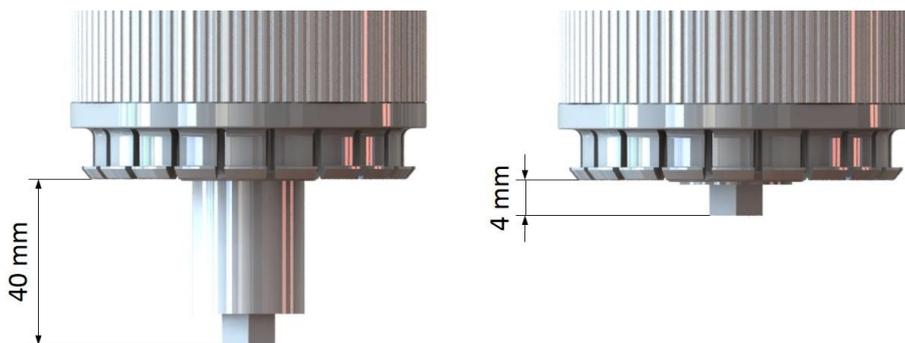


Abbildung 4-10: Einstellvorgabe der Spindel mit dem Teflonband

4.2.3 Andere Schnittstellen

Der Vollständigkeit halber wird der derzeitige Stand der Anbindungen am Motor und am Mittenrohr erklärt.

4.2.3.1 Mittenrohranbindung beim Thick-End-Down Design

Für die Mittenrohranbindung bei der TED Variante steht als Anbindungsstandard derzeit ein Schnappsystem zur Verfügung, welches in das Gegensystem, das vom Kunden als Adapter gestellt wird,

einschnappt (siehe Abbildung 4-11). Das bis dato verwendete System befindet sich aktuell in Überarbeitung. Nachfolgend wird das neue Konzept in einem späteren Kapitel vorgestellt.

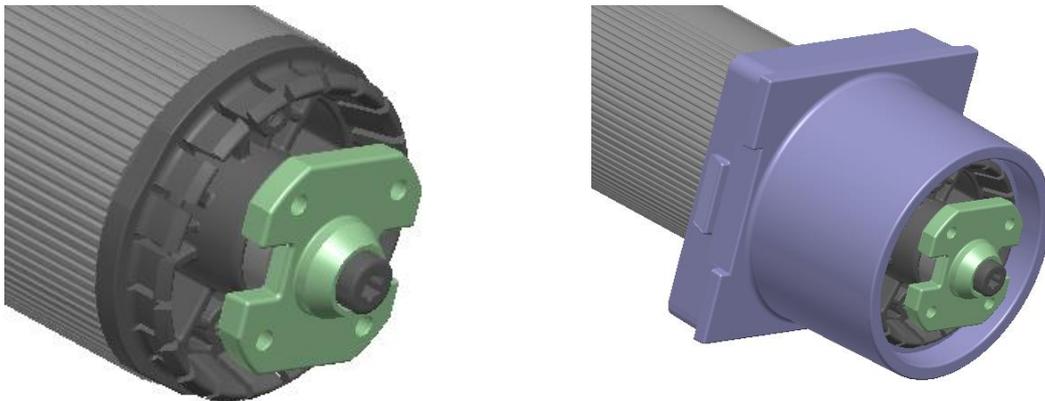


Abbildung 4-11: Antrieb ohne und mit verklebten Mittenrohradapter

Der in Abbildung 4-11 dargestellte Adapter wird beispielsweise in der Säule mit dem Mittenrohr verklebt. In Abbildung 4-12 ist ein weiteres Design eines Kundenadapters dargestellt. Dieser wird durch Pins, welche stirnseitig in die insgesamt acht Bohrungen eingreifen, formschlüssig axial mit dem Mittenrohr verbunden. Wie bereits erklärt, wird der Adapter in der Mitte axial über den Bund mit dem Antrieb verklebt.

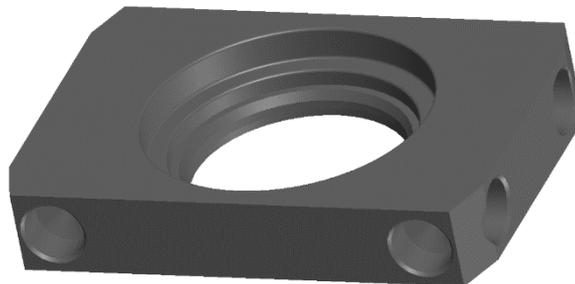


Abbildung 4-12: Kundenadapter

Zum Gewährleisten der Schnappverbindung sind enge Toleranzen an den Mittenrohradapter vorgegeben (Abbildung 4-13). Darunter versteht man die Aufnahme der Zug-/Druckkräfte sowie eine Gleitlagerfunktion der Nut. Die axialen Kräfte bilden die Säulenreibung ab, die abhängig vom Hersteller eine große Streubreite besitzen und mit maximal 300 N spezifiziert sind.

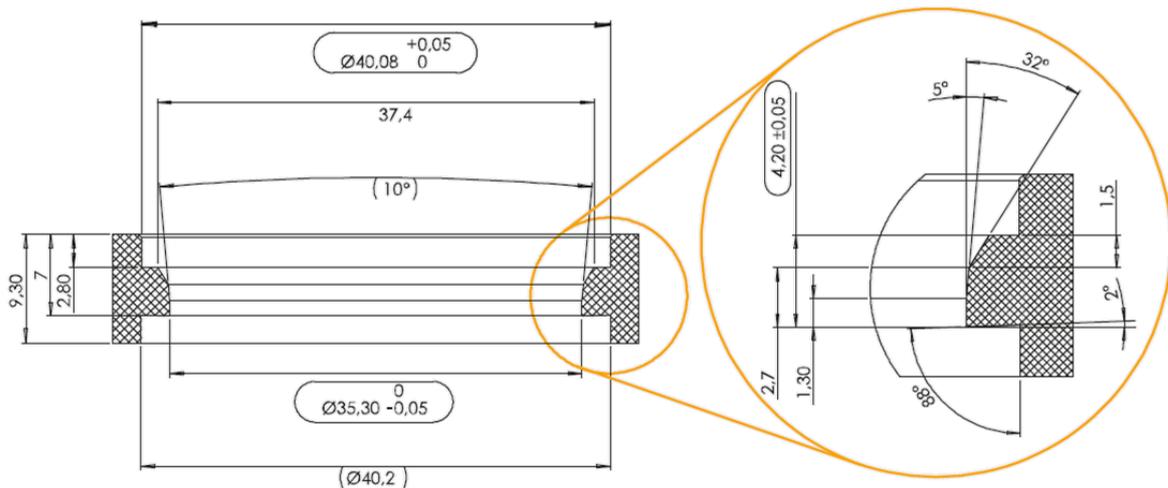


Abbildung 4-13: Mittenrohradapter

Durch die Herstellung des Adapters mittels des Spritzgussverfahrens ist es dem Kunden jedoch schwer möglich, die geforderten Toleranzen einzuhalten. Wie beschrieben, müssen für ein sicheres Einrasten der Schnapper vom Antrieb in den Mittenrohradapter mehrere Bedingungen erfüllt werden. Darunter zum Beispiel die Fügekraft, Fügegeschwindigkeit, Positionierung der Teile zueinander sowie ausreichend vorgefettete Fügebauteile zur Reibungsminderung. Die Fügekraft beträgt circa 900 N und ist von Hand nur schwer aufzubringen. Bei Nichteinhaltung einiger der angegebenen Kriterien ist es wahrscheinlich, dass die Verbindung Schaden nimmt und der gesamte Antrieb dadurch nicht mehr verwendet werden kann. Aus den genannten Gründen wurde aufgrund der hohen Ausfallsrate eine Änderungskonstruktion durchgeführt. Diese soll eine sichere, einfachere Montage hinsichtlich Positionierung und Fügekraft zur Folge haben und eine geringere Toleranzanforderung an den Kundenadapter stellen. Diese Änderung betrifft ausschließlich Kunden, die den Antrieb als TED Variante einsetzen und dabei der Mittenrohradapter Anwendung findet. Bei der TEU Variante kommt ein Tube-Adapter zum Einsatz. Die Motivation für die Änderungskonstruktion ist der schwer zu beherrschende Assemblierungsprozess, wo Schnapper durch geringe Abweichungen der Parameter oftmals Schaden nehmen. Das verursacht für den Kunden erhebliche Kosten, welche schlussendlich LOGICDATA zu tragen hat.

4.2.3.2 Motoranbindung

Die oberste Anbindung des Antriebes an die „Top-Plate“ der Säule findet stirnseitig am Motor, wie in Abbildung 4-14 dargestellt ist, statt. Die Verbindung erfolgt über zwei Schrauben, die für eine Entkoppelung mit zwischengelegten Gummischeiben ausgeführt wird.

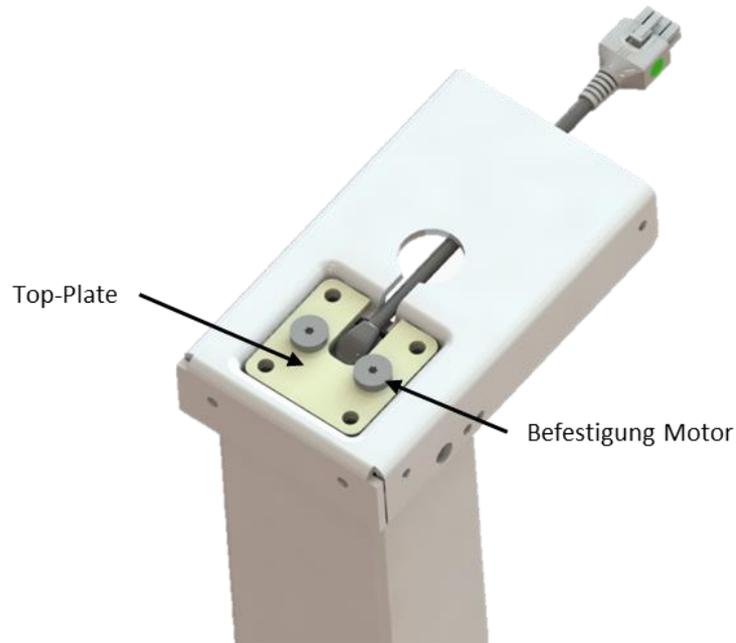


Abbildung 4-14: Antriebsanbindung an die Top-Plate

Für die Kabeldurchführung ist eine Ausnehmung an der Platte notwendig (Abbildung 4-15). Die beiden kreisrunden Aussparungen in der Säulenplatte sind für die Gummidome des Antriebs zur Befestigung vorgesehen.

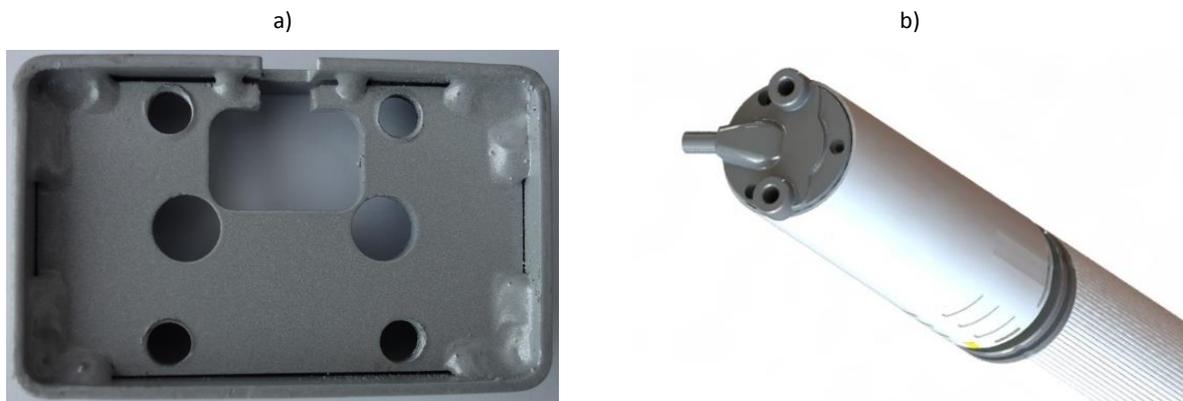


Abbildung 4-15: Motorseitige Anbindung
a) Top-Plate der Säule als Anbindung
b) Motoranbindung am Antrieb

Unter Beachtung der vorgegebenen Spezifikationen konnten in der Vergangenheit keine Vorkommnisse reklamiert werden, weshalb vorerst keine Überarbeitung dieser Schnittstelle angedacht ist. Die beiden anderen Schnittstellen wurden nach Priorisierung aufgrund steigender Kundenbeanstandungen für eine Überarbeitung als notwendig erachtet. In weiterer Folge und abhängig von den Konzepten der anderen Schnittstellen könnte hier in Zukunft eine Überarbeitung stattfinden, wenn sich dadurch ein Vorteil bei der Montage und den beschriebenen Kriterien ergeben würde.

4.2.3.3 Assemblierungsprozess

Ein möglicher Assemblierungsprozess als Zusammenbau des Antriebes mit der Säule ist gemäß Abbildung 4-16 gezeigt. Das Innenrohr und das Mittenrohr mit dem Adapter sind bereits vorassembliert.

Der Antrieb wird anschließend von oben in das Innenrohr gegeben und mit der Adapterplatte an der Motorseite verschraubt. Anschließend wird der Antrieb mit dem Mittenrohr verbunden, wozu eine axiale Kraft zum Fügen auf den Antrieb aufgebracht wird. Als letzten Schritt wird das Außenrohr über das Mittenrohr geschoben, wo anschließend die Stahlspindel mit der Bodenplatte des Außenrohrs formschlüssig mit der Bodenplatte verbunden wird.

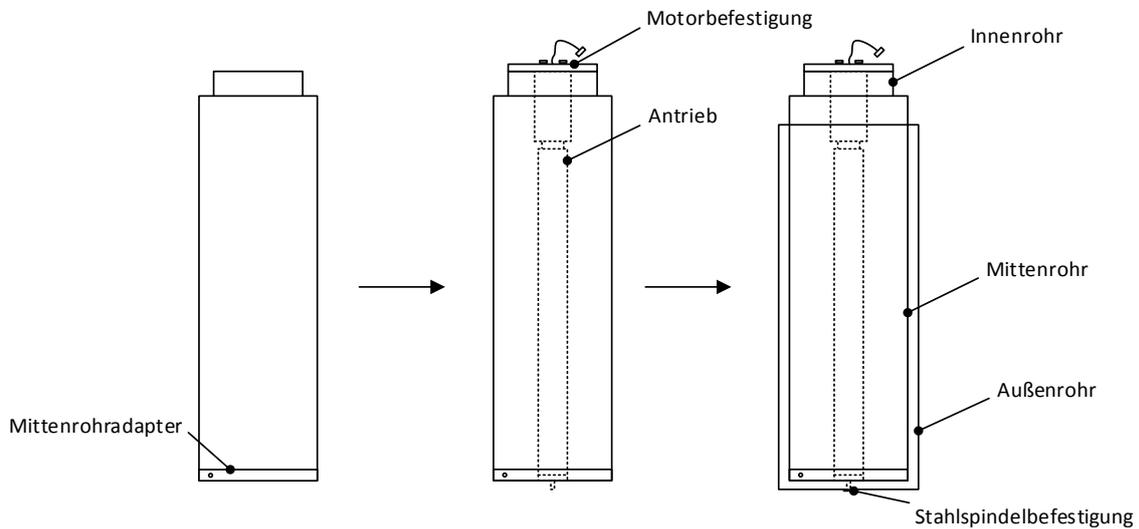


Abbildung 4-16: Assemblierensprozess

5 Konzepterstellung

Bei der Konzepterstellung wurden die beschriebene Vorgehensweise des Systems Engineerings und die der Entwicklungsmethodik in adaptierter Form angewendet. Die im Problemlösungszyklus angeführte Situationsanalyse hat im vorigen Kapitel mit der Ermittlung des Ist-Standes stattgefunden. Im Weiteren wurden unter Berücksichtigung der Aufgabenstellung diverse Kreativitätstechniken zur Konzeptfindung angewandt.

5.1 Konzeptausarbeitung

In der ersten Phase der Ideengenerierung wurden Möglichkeiten, Lösungsvorschläge und daraus abgeleitete Konzepte skizziert, die Potentiale zur Verbesserung des Ist-Standes aufwiesen. Um dies genauer hinsichtlich der Anforderungen an Bauraum und Funktion beurteilen zu können, wurde im weiteren Schritt eine 3D Konstruktion durchgeführt. Ebenso ergibt sich ein Vorteil in der Variantenbildung bei Parametervariation und in der Anpassung der 2D Zeichnungen bei Bauteiländerungen.

5.1.1 Anbindung Stahlspindel

Mittels Brainstorming-Methoden konnten insgesamt rund 20 Konzepte als CAD-Modelle erarbeitet werden. In der weiteren Folge wurden diese Konzepte in einem Gremium, bestehend aus auserwählten Personen, bewertet, woraus die nachfolgenden sechs Konzepte mit der objektiv besten Bewertung für eine weitere Detaillierungsphase ausgewählt wurden. Der Entscheidungsprozess wird unter 5.2 manifestiert. Für Konzepte der ersten Phase, die aufgrund der Bewertung nicht weiter betrachtet wurden, wird auf den Anhang mit den Stahlspindelkonzepten verwiesen.

5.1.1.1 Konzept 5 mit Selbstschneideschraube

Beginnend wird das Konzept mit einer Selbstschneideschraube (Abbildung 5-1) dargestellt. Das Konzept basiert auf einer Spindel und Platte mit kreisförmigen Ausnehmungen, wo eine gewindefurchende Schraube einen Formschluss erzeugt und somit Drehmoment und Zugkraft aufnimmt. Die Druckkraft wird über die Schulter der Spindel auf die Bodenplatte abgestützt. Diese Spindel kann in beliebigem Drehwinkel in das Loch der Bodenplatte gefügt werden. Aufgrund der Bohrungsteilung zwischen Spindel und Platte entsteht eine kreisrunde Bohrungsöffnung, die ein einfaches Einschrauben ermöglichen soll. Die Teilung, welche abhängig von der Geometrie der Paarungsteile ist, kann gemäß Formel (3-7) ausgelegt werden.

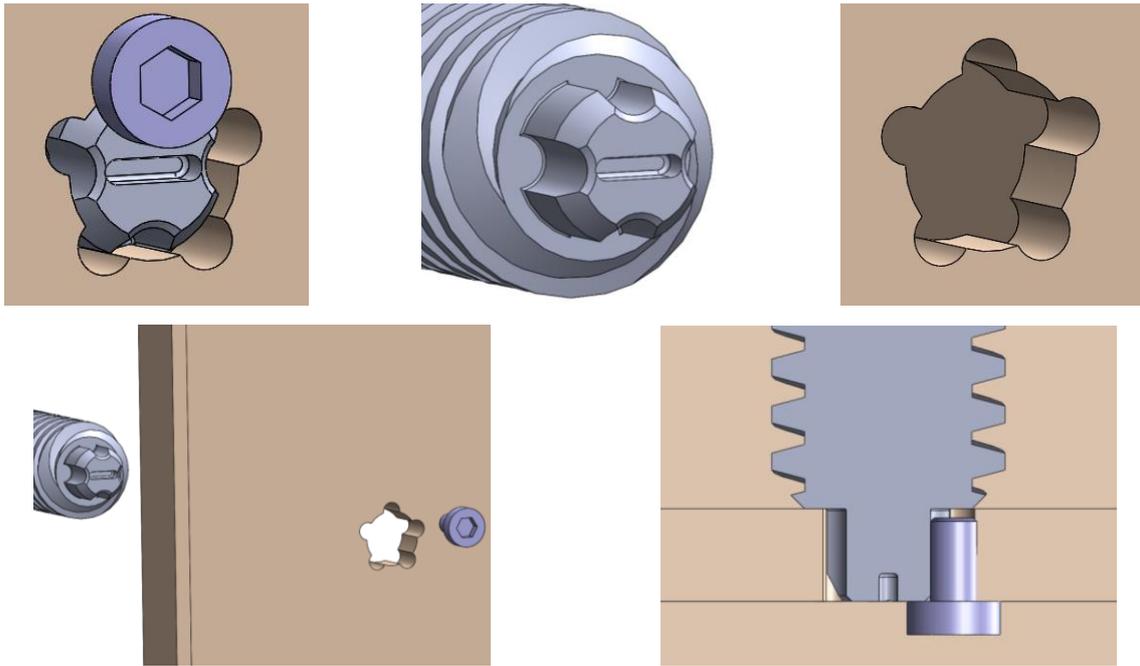


Abbildung 5-1: Stahlspindelkonzept Selbstschneideschraube (Konzept 5)

Trotz der nachträglich möglichen Justierung soll ein zeitaufwändiges Positionieren, wie es derzeit der Fall ist, entfallen. Beim Befestigen der Schraube ergibt sich bei diesem Konzept aufgrund des Formschlusses der Vorteil, dass es zu keiner nachträglichen Verstellung der Spindel aufgrund der Selbsthemmungsthematik kommen kann. Die Herstellung der Kontur in der Platte ist nach wie vor mit einem Laserschneideverfahren möglich, wobei sich die Spindelherstellung nur gering im Aufwand zum bisherigen Sechskant unterscheidet.

5.1.1.2 Konzept 5.1 Sechskant mit Selbstschneideschraube

Basierend auf dem vorigen Konzept mit einer selbstfurchenden Schraube und unter Beibehaltung des bisherigen Sechskants (Abbildung 5-2) ergab sich eine Überlegung, um die Änderungsprozedur so gering wie möglich zu halten. Dadurch können Adapterstücke, die von den Kunden als obligatorische Verlängerung des Antriebes genutzt werden, weiterhin Anwendung finden und die Adapter, die für eine einfachere Montage eingesetzt werden, entfallen. Die Änderung beläuft sich nabenseitig, wo anstelle des Sechskantlochs eine kreisrunde Bohrung mit weiteren kleinen Bohrungen für die selbstschneidende Schraube vorgesehen ist.

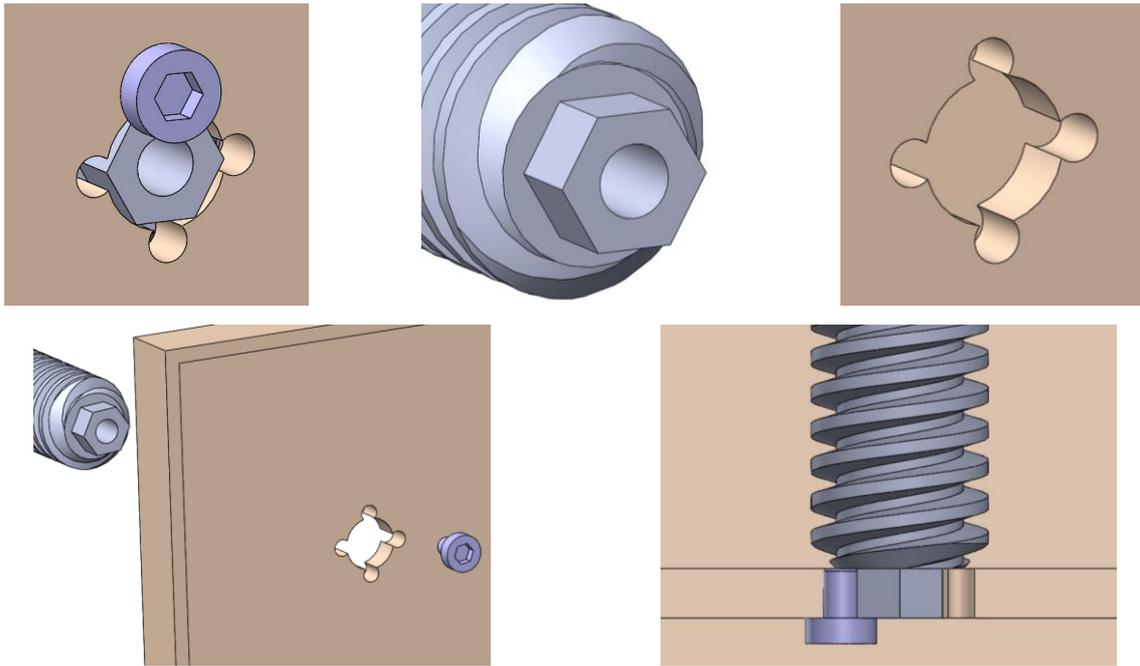


Abbildung 5-2: Stahlspindelkonzept Selbstschneideschraube mit Sechskant (Konzept 5.1)

Spindelseitig wird mit der Schraube lediglich ein Linienkontakt aufgrund der tangentialen Berührung erzeugt. Der Formschluss wird hierbei mit zumindest einer oder mehreren Schrauben erzeugt. Dadurch kann wie beim vorigen Konzept eine nachträgliche Feineinstellung mittels der Schraube selbst erfolgen, was des Weiteren auch das Problem der sich reindrehenden Spindel bei der Montage löst.

5.1.1.3 Konzept 13 Kegolverbindung

Das folgende Konzept (Abbildung 5-3) nutzt eine kraftschlüssige Verbindung, die aufgrund der konischen Spindelform ein erleichtertes Einsetzen des Antriebes erlaubt. Der Sitz und die Klemmung erfolgen hierbei über eine metrische Schraube. Für eine einfache Herstellbarkeit der Kontur im Säulenboden mittels Laserbearbeitung wurde eine zylindrische Bohrung vorgesehen. Es ähnelt dem bekannten Prinzip aus der Benchmarkanalyse (Abbildung 4-8), welches sich jedoch durch eine konische Bohrung in der Nabe unterscheidet.

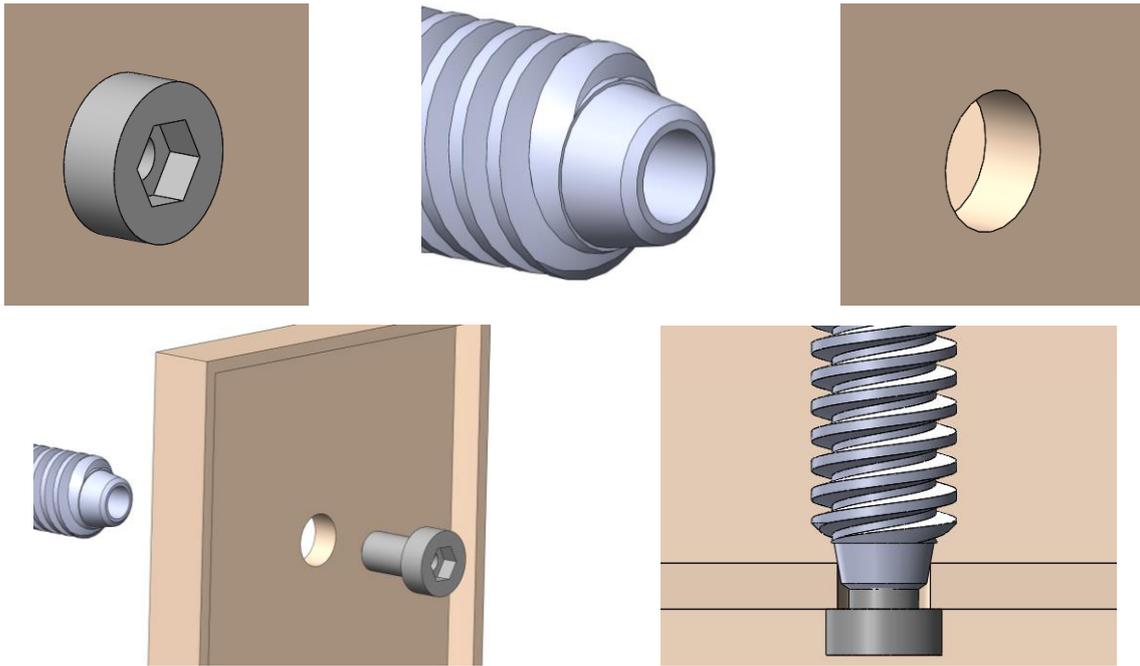


Abbildung 5-3: Stahlspindelkonzept Kegelverbindung (Konzept 13)

Bei diesem Konzept erwies sich der Kraftschluss beim Anziehen der Schraube mit der leichtgängigen Spindel als unvorteilhaft, da die Spindel aufgrund des Rechtsgewindes in den Antrieb gedreht werden konnte und somit nicht mehr die definierte Länge für den Einbau einhielt. Durch Realisierung einer linksgängigen Schraubverbindung und der damit verbundenen Möglichkeit der Abstützung der Spindel beim Herausdrehen kann dieses Problem umgangen werden. Ein wichtiger Aspekt liegt in der Abstimmung der Toleranzen, um eine definierte Verbindung herzustellen. Dies gewährleistet eine definierte Kraftabstützung an der konischen Fläche und soll zudem ein Spiel in der Verbindung vermeiden. Aufgrund der Geometrie des Spindelkonus und der zylindrischen Nabenbohrung, kommt es in dieser Verbindung zu einem radialen Linienkontakt.

Für die Prototypenherstellung der zweiten Generation wurden Varianten mit zwei unterschiedlichen Kegelwinkeln (Abbildung 5-4) umgesetzt, um bei den anschließenden Tests eine Aussage über die Dimensionierung zu erhalten, da die Kraftübertragung im Wesentlichen vom Winkel abhängt.

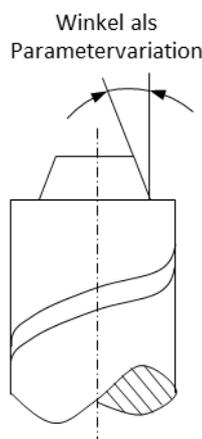


Abbildung 5-4: Variation des Flankenwinkels

5.1.1.4 Konzept 16 Keilklemmung

Das Prinzip der Keilwirkung wurde im nachfolgenden Konzept (Abbildung 5-5) umgesetzt, mit dem eine Kraftverstärkung der reibschlüssigen Verbindung einhergeht. Als nachteilig wird hier ein zusätzliches Bauteil mit einer schwierigen Handhabung aufgrund der kleinen Größe gesehen. Des Weiteren ist das Thema der Vormontage noch nicht gelöst, da die Spindel mit dem Keil und der Schraube vorassembliert ausgeliefert werden soll, damit diese beim Antriebseinbau einfach in die Säule gefügt werden kann. Dies ist aufgrund der Geometrie des Spindelkonzeptes derzeit nicht gelöst. Eine Zentrierung der Spindel für die Positionsfindung der Bohrung beim Zusammenbau kann durch einen entsprechenden Konus des Schraubenkopfs realisiert werden. Zudem ergab sich bei diesem Konzept aufgrund des Kraftschlusses das Problem des Reindrehens der Spindel bei einem rechtsgängigen Gewinde. Wie bei den anderen Konzepten kann durch die Maßnahme eines Linksgewindes und einer entsprechenden Vorrichtung das Problem beim Assemblieren beseitigt werden.

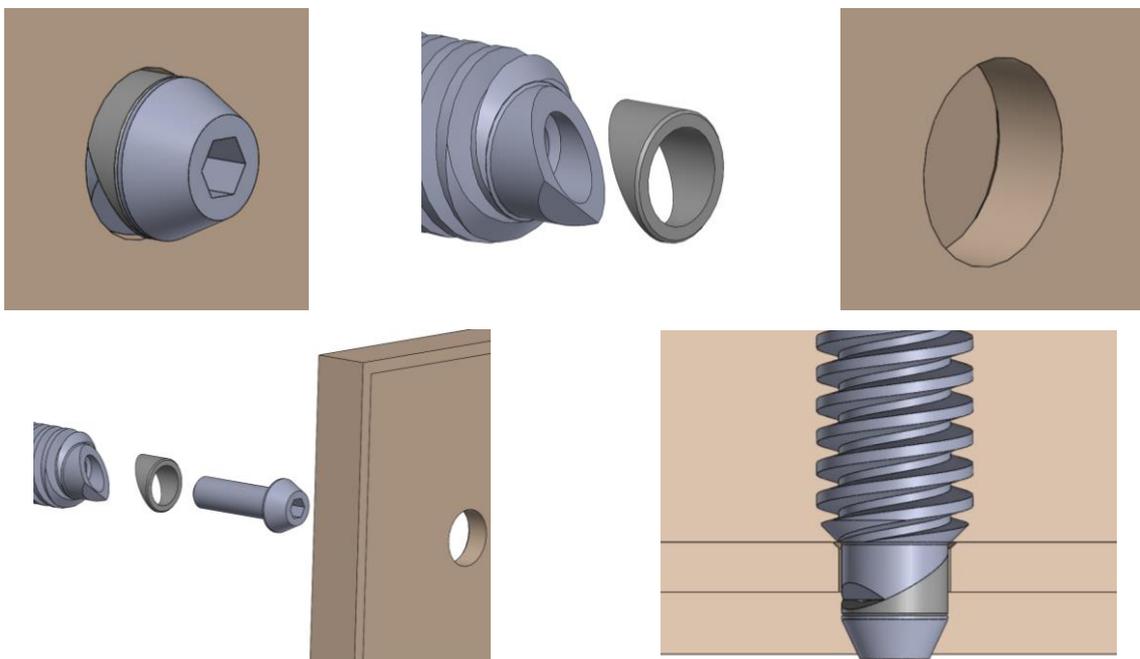


Abbildung 5-5: Stahlspindelkonzept Keilklemmung (Konzept 16)

Bei dieser radialen und auf Zug axialen Reibschlussverbindung ist es notwendig die Reibparameter, wie beispielsweise der Fetteinfluss, stets bei der Auslegung und vor allem bei den Tests zu berücksichtigen. Für die Prototypenrealisierung der zweiten Generation wurde deshalb das Konzept mit zwei unterschiedlichen Steigungswinkeln gefertigt, um die Grenzen der Kraftübertragung besser abschätzen zu können. Mit größerem Keilwinkel steigt die Klemmkraft, jedoch nimmt die Bauhöhe zu, was schlussendlich zu einem Zielkonflikt führt.

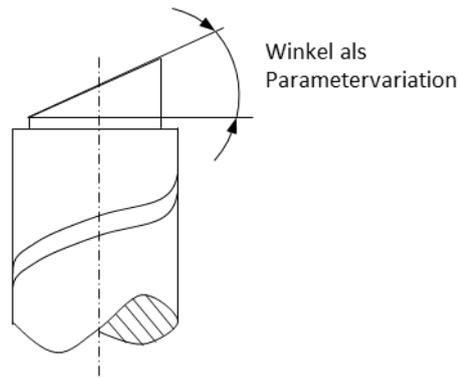


Abbildung 5-6: Variation des Steigungswinkels

5.1.1.5 Konzept 17 Klippscheibe

Ein Konzept, das die Drop&Drive Funktion zur Gänze erfüllen könnte, ist das in Abbildung 5-7 gezeigte. Darunter versteht man, wie vorhin schon der Begriff definiert wurde, das werkzeuglose Assemblieren des Antriebes mit der Säule. Die Verwendung einer eigens dafür vorgesehenen Vorrichtung für die Montage ist dabei ausgenommen. Der Zusammenbau dieses Konzeptes sieht ein Einklippen einer Scheibe in die Platte vor, wo anschließend der Antrieb in die Säule eingesetzt wird und dabei mit dem Mittenrohradapter und der Stahlspindel verbunden wird. Im Grunde genommen handelt es sich hierbei um eine inkrementelle Positionsfindung. Aufgrund der Verformung der Scheibe stellt sich im Nachhinein eine Position entweder durch Betätigung des Antriebes ein oder diese verharrt in der ursprünglichen Stellung. Dem gegenüber steht die Herausforderung in der Abstimmung dieser Klippscheibe hinsichtlich Steifigkeit und Festigkeit, um die Fügekraft bei der geforderten axialen Haltekraft und Drehmomentabstützung möglichst gering zu halten. Zudem erschwert sich hier die Prototypenherstellung, da diese Scheibe aufgrund der Eigenschaften und der geringen Wandstärke nur umformend hergestellt werden kann.

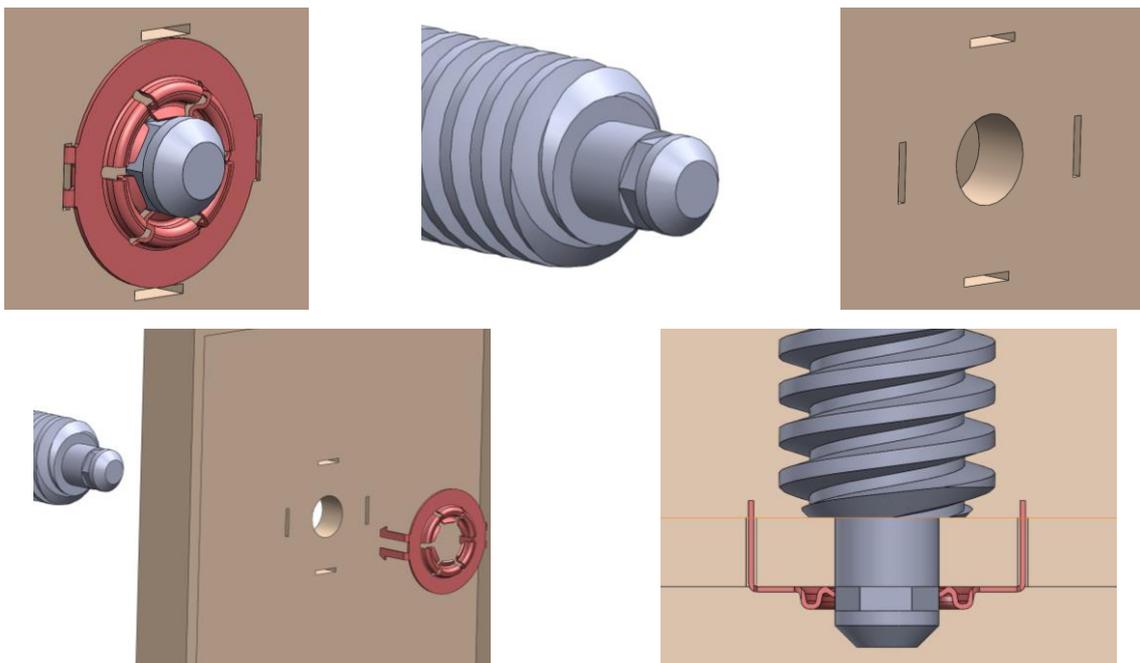


Abbildung 5-7: Stahlspindelkonzept Klippscheibe (Konzept 17)

Eine Eigenschaft besitzt dieses Konzept in der Reversibilität der Anbindung, da lediglich die Klippscheibe bei einer Demontage zerstört werden würde, wogegen der Antrieb und die Säule erneut verwendet werden können. Eine einfachere axiale Positionierung bei der Montage kann durch eine entsprechende Fase am Ende der Spindel erzeugt werden.

5.1.1.6 Konzept 18 Verprägung

Ein weiteres Konzept liegt im Ansatz der plastischen Verformung des Spindelendes, wie es in Abbildung 5-8 dargestellt ist. Bei diesem Verprägekonzepth wird das Stahlspindelende so bearbeitet, dass sich aufgrund einer angepassten Schraubenkopfgeometrie in Form eines Konus eine Keilwirkung ergibt, die den Steg der Spindel plastisch verformt und somit radial in das Bohrungsloch der Säule drückt.

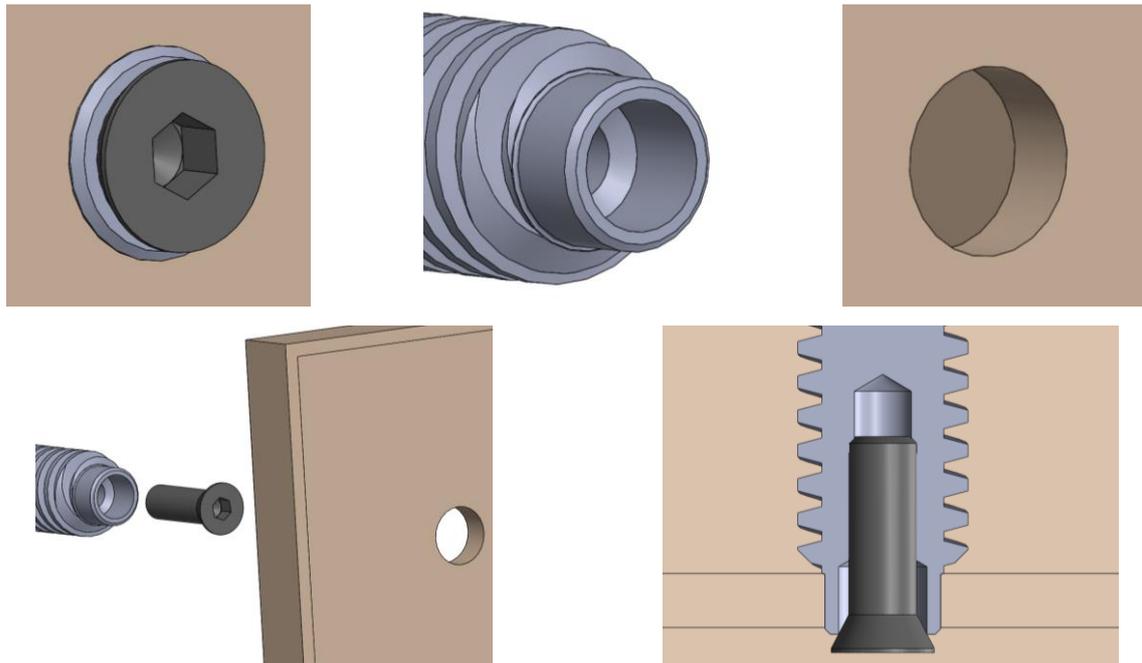


Abbildung 5-8: Verprägung (Konzept 18)

Da dieses Konzept von den vorherrschenden Reibbedingungen abhängt, ist deshalb eine Überprüfung der Verbindung in einem gefetteten Zustand notwendig, da es aufgrund der Spindelschmierung zu einer ungewollten Schmierung der Stelle kommen kann. Zudem ist es relevant, wie stark sich die verändernden Parameter auf die Verbindung hinsichtlich Kraftübertragung, Festigkeit und Momentabstützung auswirken.

5.1.2 Transportsicherung

Der Transportsicherung beziehungsweise Spindelbremse wurde weniger Aufmerksamkeit geschenkt als der Stahlspindelanbindung, da die Fixierung für die definierte Hubeinstellung und das derzeit bestehende Sechskantsystem notwendig ist, damit die Montage ohne Adapter einfacher wird. Unabhängig davon wird die Fixierung durch die in Kapitel 4 beschriebenen Prinzipien angewendet, um die entsprechende Länge voreingestellt für die Montage parat zu haben. Für diese Art der Anwendung ist die Anforderung an die Genauigkeit der Einstellung weitaus geringer als die der Winkeleinstellung aufgrund der geringeren Toleranzen bei der Sechskantausnehmung in der Bodenplatte.

Das in Abbildung 5-9 dargestellte Konzept sieht eine in die Spindelmutter eingespritzte Geometrie vor, die den Anforderungen einer Transportsicherung genügen soll. Es sei nochmals an die Anforderung der Fixierung erinnert, dass diese keine Verdrehung verursacht und zugleich die geforderten zehn Testzyklen

übersteht und anschließend die Hemmung soweit intakt ist, dass die geforderte Hubleistung für den Kunden uneingeschränkt zur Verfügung steht. Eine große Herausforderung bei solch einem Konzept ist die Prozesssicherheit, da kleinste Abweichungen in den Toleranzen zu unterschiedlichen Problemen führen können.

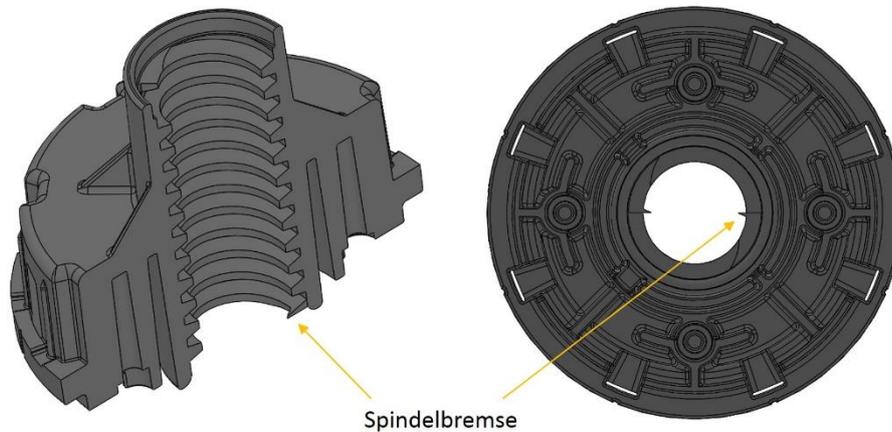


Abbildung 5-9: Spindelbremsfunktion durch Spritzgussverfahren

Überlegungen von Konzepten, die als Spindelbremse dienen, wurden Großteils als grobe CAD-Konzepte erstellt. Im Laufe der Arbeit stellte sich die anfangs als Sollziel definierte Anforderung, des Auskommens ohne zusätzlichen Bauteils als immer wichtiger werdender Aspekt heraus, was schlussendlich zu einem Musskriterium führte. Da bis auf das gezeigte Prinzip kein weiteres Konzept ohne ein zusätzliches Bauteil gefunden wurde, gab es keine weiteren Entwürfe. Anfangs gab es die Überlegung ein zusätzliches Teil nach den Run-In und End-of-Line Tests einzubauen, welches sich nach dem Einbau bei Inbetriebnahme selbsttätig löst und somit keinen Einfluss auf die Funktion ausübt. Dies ist im Groben ein ähnliches Prinzip, wie es mit dem Teflonband und dem Heißklebepunkt zur Anwendung kommt. Beim Verkleben der Spindel mit der Spindelmutter sind die Anforderungen an die Oberfläche bezüglich Reibwerte im Sinne von Schmierfett von großer Bedeutung.

5.1.3 Mittenrohranbindung

Da die Mittenrohranbindung nicht Inhalt dieser Arbeit ist, sich jedoch in Überarbeitung befindet und Teil des Drop&Drive Systems ist, wird Vollständigkeitshalber zumindest der letzte Konzeptstand gezeigt. Bei diesem Konzept handelt es sich ebenfalls um ein Schnappsystem in radialer Richtung (siehe Abbildung 5-10) wie beim vorigen System (gezeigt unter Ist-Stand). Nach mehreren Iterationsschleifen wurden die Materialpaarung und die Geometrien so gewählt, dass die Flächenpressung auf die Bauteile minimiert werden konnte und dabei die Fügekraft wesentlich geringer ist. Die axiale Kraft der Kunststoffschnapper wird hierbei über die darüber liegende Sintermetallplatte aufgenommen, um somit die Festigkeitseigenschaften der Verbindung zu verbessern. Erste Tests zeigten gute Festigkeits- und Gleiteigenschaften der Verbindung.

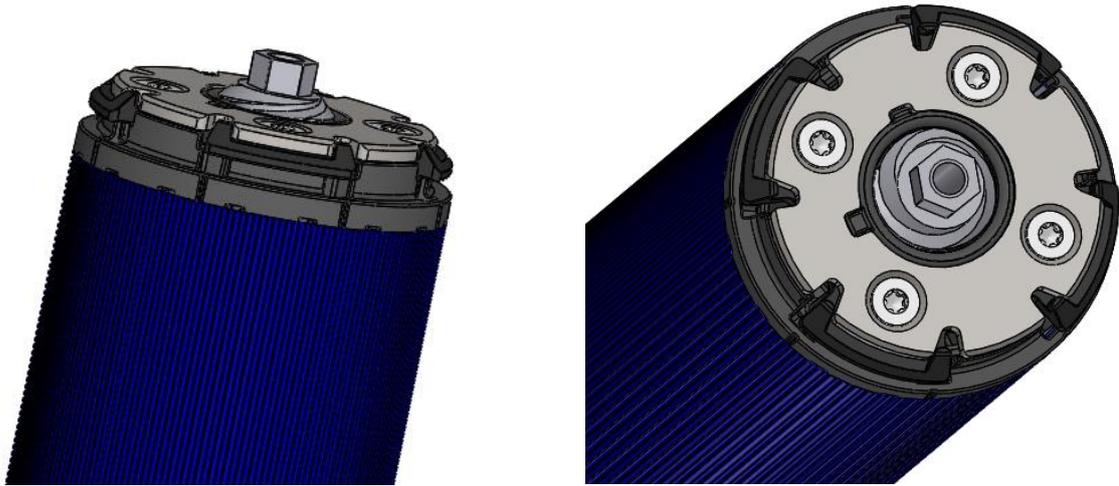


Abbildung 5-10: Konzept Mittenrohranbindung

Die beiden Ausnehmungen in der verschraubten Metallplatte sowie die radial eingreifenden Federn der Spindelmutter sind für die erleichterte Montage gedacht und setzen die Poka Yoke Strategie fort. Das neue System des Mittenrohradapters in Anwendung mit einem eingeklippten Kundenadapter ist in Abbildung 5-11 gezeigt.



Abbildung 5-11: Mittenrohranbindung mit verbautem Adapterstück

Die hohen Toleranzanforderungen aufgrund der Schnappverbindung des bisherigen Systems (Abbildung 4-13) führten bei Nichteinhaltung zu einer hohen Ausfallsrate, die aufgrund des neuen Radialfederkonzeptes herabgesetzt werden konnten. Die Anpassung des Adapters für den Kunden liegt in einer dünneren Steghöhe des Innenrings (Abbildung 5-12). Ein Gleichbleiben der Gesamthöhe hatte eine Anpassung der Steghöhe zur Folge.

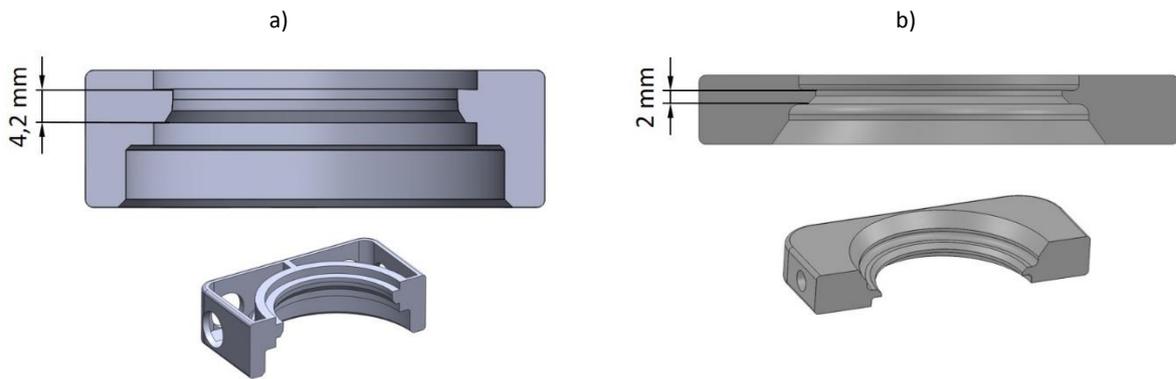


Abbildung 5-12: Steghöhe Mittenrohradapter
a) bisherige Version mit 4 mm Steghöhe
b) neue Version mit 2 mm Steghöhe

5.2 Konzeptbewertung

Als Grundlage für eine möglichst objektive Bewertung der Konzepte wurde für die Nutzwertanalyse im Vorhinein ein paarweiser Vergleich durchgeführt. Zuerst wurden dabei in einem Gremium aus Technikern, Verkaufspersonal und Feld Applikation Personal von LOGICDATA Kriterien definiert. Nach der ersten Konstruktionsphase fand eine Bewertung anhand der erstellten 3D CAD-Modelle unter Anwendung der Nutzwertanalyse mit Personal aus dem technischen sowie kaufmännischen Bereich statt.

5.2.1 Paarweiser Vergleich

Wie vorhin erwähnt, wurde der paarweise Vergleich als Vorstufe der Nutzwertanalyse durchgeführt, um die Kriteriengewichtung für die Bewertung festzulegen. Tabelle 5-1 zeigt einen exemplarischen Auszug des paarweisen Vergleichs.

Tabelle 5-1: Auszug aus dem paarweisen Vergleich

	gegenüber bewerten	Fixe Kosten f. Kunden	Stückkosten f. Kunden	Montageprozess beim Kunden	Transportsicherung	Kosten für LD	lösbare Verbindung	Summe	%	Rangfolge
Investitionskosten, Maschinen, Änderungskosten	Fixe Kosten f. Kunden		0	0	2	1	2	5	16,7	4
Bauteilkosten, Assemblingkosten	Stückkosten f. Kunden	2		1	1	1	2	7	23,3	2
Einfachheit, Positionsfindung	Montageprozess beim Kunden	2	1		2	1	2	8	26,7	1
	Transportsicherung	0	1	0		1	2	4	13,3	5
Herstellkosten, Assemblingkosten, Bauteilkosten	Kosten für LD	1	1	1	1		2	6	20,0	3
lösen ohne den Antrieb selbst zu beschädigen	lösbare Verbindung	0	0	0	0	0		0	0,0	6
								Σ	100	

Legende

Erläuterung:	2 wichtiger	horizontal wichtiger als vertikal
	1 gleich wichtig	horizontal gleich vertikal
	0 weniger wichtig	horizontal weniger wichtig als vertikal
Definition KO-Kriterien:	Drop&Drive	

Die Kriterien in der paarweisen Bewertung wurden unter Einbezug verschiedener Personen aus mehreren Bereichen im Vorhinein festgelegt. Es wurden dabei sechs Kriterien für ein bestmögliches Abdecken der Stahlspindelanbindung bestimmt. Die Kriterien sollen alle relevanten Anforderungen an die Anbindung der Stahlspindel abbilden.

- Fixkosten für den Kunden

Die Kosten, die beim Kunden anfallen, wenn vom bestehenden System auf das neue System umgerüstet wird, um die Assemblierung vornehmen zu können, werden als Fixkosten definiert. Dies beinhaltet Maschinen, Vorrichtungen und anfallende Änderungskosten. Diese Kosten werden aufgrund der unterschiedlichen Stückzahlen der Abnehmer berücksichtigt. Vor allem bei Kunden mit geringen Stückzahlen können hohe Umrüst- sowie Investitionskosten verursacht werden.

- Stückkosten für den Kunden

Stückkosten berücksichtigen beispielsweise die Bauteilkosten, Assemblierungskosten und werden in diesem Zusammenhang auch als variable Kosten bezeichnet. Bei den Assemblierungskosten fließt auch die Dauer des Zusammenbaus ein. Diese Kosten sind speziell für Kunden mit hohen Stückzahlen von großer Bedeutung. Die jährliche Abnahmemenge bei „großen“ Kunden liegt bei circa 200.000 Stück.

- Montageprozess beim Kunden

Die Motivation der Entwicklung einer neuen Anbindung der Stahlspindel war in der Erleichterung des Montageprozesses für den Kunden. Hier liegt der Fokus in der Einfachheit und der vereinfachten Positionsfindung beim Zusammenbau. Im Vergleich ist die Positionsfindung beim bestehenden System mit dem Sechskant schwer möglich.

- Transportsicherung

Das Thema der Transportsicherung beinhaltet die Fixierung der Stahlspindel, die zusätzlich berücksichtigt werden soll. Ausgehend von den Konzepten soll eine Abschätzung der Realisierung einer Transportsicherung erfolgen. Aufgrund der Objektivität und der Tatsache der Bewertungsergebnisse mit der großen Standardabweichung wurde dieses Kriterium für die finale Auswertung aus der Bewertung herausgenommen.

- Kosten für LOGICDATA

Hier stehen den anderen Kriterien die Kosten der Herstellung, Assemblierung und Bauteile seitens LOGICDATA gegenüber. Es ist dabei erheblich, wie stark sich die Kosten mit der Neuerung ändern würden, da in der anschließenden Nutzwertanalyse auch das bestehende Konzept des Sechskants bewertet wurde, um als Referenz zu dienen.

- Lösbare Verbindung

Die Anforderung an eine lösbare Verbindung liegt im Ausbauen des Antriebes aus der Säule ohne Schaden zu nehmen und somit zur Weiterverwendung des Antriebes. Dieses Kriterium entspricht einem nice to have, da es von manchen Kunden erwünscht ist und andere wenig Wert darauf legen. Es sei gesagt, dass über eine lösbare Verbindung nur nachgedacht wurde, da es bei der bestehenden Mittenrohranbindung Probleme gab und somit eine de-Assemblierung des Antriebes von Vorteil ist. Bei einer prozesssicheren Mittenrohranbindung des neuen Konzeptes wird der Option einer lösbaren Verbindung wenig Bedeutung beigemessen.

Die Gesamtauswertung des paarweisen Vergleichs mit den genannten Kriterien liefert das Ergebnis, dass der Montageprozess als das am höchsten bewertete Kriterium ist. Als zweitwichtigstes Kriterium wurden die Stückkosten für den Kunden bewertet. Nachfolgend werden die Kosten für LOGICDATA als relevant eingestuft. Eine lösbare Verbindung wurde unter Berücksichtigung des neuen Mittenrohrkonzeptes als unwichtigstes Kriterium empfunden. Die fixen Kosten für den Kunden wurden in der Gesamtbewertung als gering eingestuft, da im Speziellen Kunden mit hohen Stückzahlen bevorzugt behandelt werden.

In die Auswertung der einzelnen Bereiche des Unternehmens wie Mechatronik, Verkauf, Feld Applikation und Gesamt als Vergleich kann im Anhang 10 eingesehen werden.

5.2.2 Nutzwertanalyse

Ein Auszug aus der Nutzwertanalyse, wie dies unter 2.3 in den theoretischen Grundlagen behandelt wurde, ist in Tabelle 5-2 zu sehen. Die Bewertung der Gewichtung der einzelnen Kriterien basiert auf der Gesamtauswertung des paarweisen Vergleichs der jeweiligen Kriterien und dem daraus ermittelten Verteilungsschlüssel. Hier ist die Bewertung des bestehenden Konzeptes des Sechskants gezeigt, welcher ebenso in die Bewertung mit aufgenommen wurde, um einen Vergleich gegenüber den Alternativen ziehen zu können. Die prozentuale Gewichtung wurde durch hundert geteilt, und diese Punkte wurden mit den jeweiligen Bewertungspunkten multipliziert. Die Rangfolge der Konzepte ergab sich aus der Kumulierung der sieben bewerteten Kriterien. Im Gremium wurde nachträglich

entschieden, dass die Transportsicherung isoliert betrachtet werden soll, um die Konzeptbewertung dadurch nicht zu verfälschen. In die vollständige Bewertung aller Alternativen kann in Anhang 14 eingesehen werden.

Tabelle 5-2: Auszug aus der Nutzwertanalyse für die Sechskantspindel

		Konzept 0 LD Sechskant	
Kriterien	Gewichtung	Punkte	gew.
Fixe Kosten f. Kunden	14%	10	1,4
Stückkosten f. Kunden	27%	9	2,4
Montageprozess beim Kunden	30%	1	0,3
Transportsicherung			0,0
Kosten für LD	18%	8	1,4
lösbare Verbindung	12%	10	1,2
Σ	100%		6,6
Rang		8	

5.3 Konzeptauswahl

Die Konzeptauswahl wurde anhand der Dokumentation und Auswertung der Nutzwertanalyse getroffen. Abschließend wurde eine Kontrollschleife durchgeführt, bei der ausgeschiedene Konzepte nochmals grob hinsichtlich ihrer Eigenschaften objektiv analysiert wurden. Gesamt wurden sechs (fünf plus eins) Konzepte ausgewählt, mit denen in eine erste Prototypenphase gestartet wurde. Das Konzept 5.1, Sechskant mit Selbstschneideschraube, wurde nachträglich in die Prototypenphase zwei mitaufgenommen, obwohl es nicht in der Bewertungsmatrix berücksichtigt wurde. Grundsätzlich wäre für diesen Fall der Entscheidungsprozess mittels der Analyse erneut zu durchlaufen. Aufgrund der Abwandlung des bestehenden Sechskantkonzeptes mit gleichbleibender Sechskantform, geänderter Aufnahmekontur der Säule und einer Selbstschneideschraube wurde aus Zeitgründen dagegen entschieden.

Wie unter 5.6 die Konzepte hinsichtlich der Serienanwendung analysiert wurden, wurden vier der sechs Varianten, wie sie später in Abbildung 5-11 gezeigt und unterteilt sind, für eine zweite Prototypenphase ausgewählt. Schlussendlich wurde Konzept 5 mit der Selbstschneideschraube, Konzept 5.1 mit dem Sechskant und der Selbstschneideschraube, Konzept 13 mit dem Reibkonus und Konzept 16 mit der Keilklemmung ausgewählt. Aus den ursprünglich sechs ausgewählten Konzepten fiel Konzept 18 mit der Verprägung nach der ersten Prototypenphase aufgrund der vorhin beschriebenen Risiken weg sowie Konzept 17 mit der Klippscheibe, das keine Möglichkeit einer Umsetzung bot. In Kapitel 6 werden die Ergebnisse zu den Prototypenphasen näher erläutert und die Prototypen analysiert.

5.4 Konzeptphasen

Es wurden im Vorhinein zwei grobe Konzeptphasen definiert, die sich in eine Entwurfskonstruktion und in eine Konzeptdetaillierung gliedern lassen. Vorgegangen sind diesen beiden Phasen die Konzeptausarbeitungen aus den Kreativitätsmodellen.

- Entwurfskonstruktion

Die Entwurfskonstruktion bildete den ersten Schritt der Detaillierungsphase der Konzepte, wo die ersten 20 Konzepte mittels CAD-Anwendung grob detailliert wurden. Der Hintergrund dieser Überlegung war die sich ergebende Zeitersparnis bei möglicherweise anfallenden nachträglichen Änderungen von Parametern. Diese Modelle wurden zudem für die Bewertung in der Nutzwertanalyse herangezogen. Außerdem konnte in dieser Phase eine grobe Bauraumabschätzung erfolgen. Konzepte des Entwurfsstadiums, die bei der Bewertungsanalyse geringes Potential aufwiesen, sind in Anhang 2 bis Anhang 9 gezeigt.

- Konzeptdetaillierung

In der Konzeptdetaillierung ist die Herstellung erster Prototypen vorgesehen. Die unter 6.1.1 gezeigten Prototypen wurden bei LOGICDATA gefertigt. Der Sinn der Konzeptdetaillierung liegt in einer allgemeinen Aufwandsabschätzung und einer Bewertung der Herstellbarkeit. Da es für die Fertigung in der ersten Phase lediglich begrenzte Möglichkeiten gab, konnten nicht alle anfänglich sechs ausgewählten Konzepte als Prototypen umgesetzt werden. Als Prototypen wurden die Konzepte 13 mit einem Reibkonus, Konzept 16 mit einer Keilklemmung, Konzept 17 mit einer elementaren axialen Sicherungsscheibe und Konzept 18 mit der Verprägung verwirklicht. Der Anwendungsfall wurde mit den anfangs definierten Spezifikationen hinsichtlich Kraft- und Momentabstützung getestet. Aufgrund Fertigungsungenauigkeiten war die Aussagekraft über Kraftaufnahme als gering einzustufen, weshalb eine zweite Prototypenphase als sinnvoll erachtet wurde. Die Prototypen der ersten Phase sind in Kapitel 6.1.1 dargestellt. Für die Prototypenphase zwei, die an eine externe Fertigungsfirma vergeben wurde, wurden die Konzepte 5 mit einer Selbstschneideschraube, Konzept 5.1 mit dem Sechskant und einer Selbstschneideschraube, Konzept 13 mit einer Kegolverbindung und Konzept 16 mit einer Keilklemmung ausgewählt. Aus den zuvor insgesamt sechs Prototypen wurden diese vier ausgewählt, da man sich im Nachhinein nochmals in einer objektiven Bewertung über die Kosten- Nutzsituation der Prototypen Gedanken machte. Dabei ist man zum Entschluss gekommen, dass für Konzept 17 mit einer Klippscheibe mehr Entwicklungsaufwand geleistet werden muss, was den Rahmen dieser Diplomarbeit übersteigen würde. Außerdem entschied man sich in der Prototypenphase zwei gegen das Konzept 18, da man dieses ausschließlich mit einem Linksgewinde und einer Vorrichtung realisieren kann und Konzepte ohne eine Vorrichtungsnotwendigkeit bevorzugt wurden. Die Prototypen sind in 6.1.2 gezeigt.

5.5 FMEA

Abschließend wurde nach den Konzeptphasen eine Design Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (D-FMEA) durchgeführt (Auszug aus der D-FMEA der Stahlspindelanbindung siehe Anhang 15), um die möglichen Probleme der jeweiligen Konzepte einschätzen und vergleichen zu können. Dabei wurde die Funktion der gesamten Anbindung sowie der einzelnen Teile wie Spindel, Säule und beispielsweise Verbindungselement wie Schraube bewertet. Ab Erreichen einer Risikoprioritätszahl von 400 Punkten aus Bedeutung, Auftreten und Entdeckung wurden dementsprechende Abstellmaßnahmen definiert. Die Schwelle für die Maßnahmeneinleitung wurde aufgrund der groben Konzeptphase bei 400 Punkten angesetzt. Die Bewertung der einzelnen Kriterien wurde in Zwischenschritten von null bis zehn durchgeführt. Dies wurde eingeführt, um die Effizienz der Analyse zu steigern und um den Fokus auf die Kriterien selbst zu lenken.

Die Gliederung dieser Analyse erfolgte in der zuerst durchgeführten gesamten Stahlspindelanbindungssituation. Nachfolgend wurde die Bewertung einzeln für die Spindel, die Säule und das Befestigungselement durchgeführt. Maßnahmen sind lediglich für die Stahlspindelanbindung

getroffen worden, da bei den einzelnen Teilen keine hohen Risikozahlen ermittelt wurden. Somit wurden bei der Stahlspindelanbindung selbst bei nahezu allen Konzepten dieselben drei kritischen Pfade festgestellt. Für die Abstellung dieser Fälle wurden spezielle Maßnahmen abgeleitet wie beispielsweise die Verwendung einer Schraubensicherung bei Einsatz einer Schraubverbindung oder ein Test mit dem schwergängigsten Kavitätenmix vom Antrieb. Das heißt die Toleranzpaarung mit dem kritischen Pfad mit einem erschwerten Verdrehen der Stahlspindel.

5.6 Betrachtung der Umsetzbarkeit für die Serienanwendung

Hier wurden die jeweiligen Konzepte der Stahlspindelanbindung, Mittenrohranbindung und Transportsicherung für den Einsatz in der Serie analysiert.

5.6.1 Umsetzbarkeit der Stahlspindelkonzepte

Bei der Auswahl der Stahlspindelkonzepte für die Konzeptphase wurde bestmöglich auf die Umsetzbarkeit für eine Serienlösung geachtet. Ausschlaggebend war beispielsweise die Herstellbarkeit einer zweidimensionalen Kontur in der Säule. Hintergrund ist die Herstellung der Säulen bei den Kunden, die weiterhin eine einfache Fertigung gewährleisten soll. Bei den Stahlspindelkonzepten wurde darauf geachtet, dass sich die Konstruktion für eine CNC Fertigung eignet.

Bei Konzept 5 mit der Selbstschneideschraube ergibt sich der Vorteil der nicht aufkommenden Problematik bei nicht vorhandener Selbsthemmung der Spindel, da dies beim Zusammenbau über eine formschlüssige Verbindung erfolgt. Die inkrementelle Positionierung für die Befestigung der Schraube in der kreisrunden Geometrie kann durch eine entsprechende Teilungszahl der Geometrien in der Spindel und der Säule als Nabe optimiert werden. Angedacht ist eine entsprechend feine Teilung durch entsprechende Fasen an den Konturen, die eine automatische Positionsfindung beim Ansetzen der Schraube ermöglicht.

Aus dem Konzept 5 mit der exzentrisch angeordneten Selbstschneideschraube ging das abgeleitete Konzept 5.1 mit der Selbstschneideschraube und dem bestehenden Sechskant hervor. Hier liegt der Vorteil in der Beibehaltung der Form der Spindel mit dem Vorteil eines geringen Änderungsaufwandes bei LOGICDATA. Änderungen betreffen die Nabenausführung in der Säule und die Verwendung einer selbstschneidenden Schraube anstatt der bisherigen M4 Innensechskantschraube.

Konzept 13 als kraftschlüssige Verbindung in Radialrichtung mit einem Reibkonus erweist sich mit der nicht inkrementellen Verbindung als vorteilhaft beim Zusammenbau und eignet sich dadurch für eine automatisierte Assemblierungslinie. Der Problematik der nicht selbsthemmenden Spindel kann entweder mittels der Auslegung durch Reibungserzeugung des Konus an der Bohrung entgegengewirkt werden oder durch Ausführung eines Linksgewindes. Bei der Reibungserzeugung am Umfang muss das Reibmoment größer als das notwendige Schraubenmoment der Schraubverbindung sein, um ein ungewolltes Verdrehen der Spindel zu vermeiden.

Als teilweise unvorteilhaft wird das Konzept 16 mit der Keilklemmung angesehen, da es aufgrund des kleinen Zusatzbauteils zu Handhabungsproblemen beim Assemblieren und bei der Herstellung kommen kann. Bei diesem Konzept gibt es bis dato keine konkrete Lösung, wie man eine Vorassemblierung der Spindel mit dem Klemmteil und der Schraube vornehmen kann, um einen einfacheren Einbau in die Säule zu erzielen. Ist man auf ein nachträgliches Assemblieren der Spindel beim Kunden angewiesen, so ist kein Vorteil gegenüber dem bestehenden System zu erkennen.

Ein für den Assemblierungsprozess favorisiertes Konzept ist Konzept 17 mit der Klippscheibe, welches im günstigsten Fall werkzeuglos funktioniert. Je nach Fügekraft kann das Assemblieren mit einer Vorrichtung erfolgen. Die Fügekraft darf dabei nicht die maximale Axialdruckkraft auf den Antrieb

überschreiten, da es sonst zu Schäden kommen kann. Bei dem Konzept ist die inkrementelle Voreinstellung für die Positionierung nahezu unwichtig, da es in diesem Zustand verharrt oder sich bis zur nächsten Arretierungsposition weiterdreht. Eine Abschätzung der Umsetzbarkeit mit der gewünschten Funktion des Zusammenbaus ist hier schwer möglich. Als problematisch wird bei diesem Konzept die Abstimmung der Parameter der Klippscheibe als Stanz-Biegeteil angesehen, um die geforderten Kräfte und Momente aufnehmen zu können, ohne die maximale Druckkraft auf den Antrieb zu überschreiten. Herstellkosten und die Komplexität der Fertigung wurden als gering eingestuft.

Ähnlich dem Konzept 16 der Reibschlussverbindung erweist sich das Konzept 18 mit der Verprägung für eine automatisierte Fertigung als eine nicht inkrementelle Positionierung als durchaus interessant. Einen Nachteil weist das System in Bezug auf die Wiederverwendbarkeit des Antriebes auf, da die Spindel aufgrund der Verprägung kein weiteres Mal verbaut werden kann.

5.6.2 Umsetzbarkeit der Mittenrohranbindung

Beim neuen Mittenrohranbindungskonzept tritt die Problematik mit der Bauhöhe des Antriebes auf, welche eine Änderung des Kundenadapters hervorruft. Die einfachste Änderung bedarf der Steghöhenabsenkung von vier auf zwei Millimeter, um die Gesamteinbaulänge nicht zu beeinflussen. Eine weitere Möglichkeit ergibt sich durch Änderung der Rohrlänge, die zwar keine Änderungen beim Kunden hervorruft, jedoch wären die Antriebsanpassungen am Antrieb um ein Vielfaches höher, wie beispielsweise eine Konstruktionsänderung der Spindel mit der Längenanpassung des Aluminiumrohrs. Der überarbeitete Mittenrohradapter hat zum Ziel dem Kunden eine größere Toleranzbreite zu geben, um aufwendige Fertigungsverfahren und Nachbearbeitungen überflüssig zu machen. Systemänderungen sind möglichst zu vermeiden, da dies neue Zertifizierungen sowie weitere kostspielige Änderungen mit sich bringt.

5.6.3 Umsetzbarkeit der Transportsicherung

Für die Transportsicherung der Stahlspindel konnten keine weiteren vielversprechenden Konzepte ohne zusätzliche Bauteile gefunden werden. Man versucht das bereits beschriebene Konzept mit der Implementierung von Konturen in die Spindelmutter miteinzuspritzen und somit große Änderungen zu vermeiden. Die Umsetzbarkeit hängt hierbei von der Abstimmung diverser Spritzparameter ab. Da für die Umsetzung dieser Funktion keine weiteren Teile verwendet werden sollen, wurden die übrigen Ideen nicht in eine Entwurfskonstruktion und eine Prototypenphase fortgeführt.

5.7 Adaptierbarkeit für Stahlspindelsysteme

Wie in der Spezifikation und eingangs in der Arbeit erwähnt, möchte man dem Kunden eine einfachere Assemblierungsmöglichkeit anbieten. Relevant ist außerdem der erforderliche kundenseitige Aufwand, um vom bestehenden System auf das neue Konzept umstellen zu können. Es werden dabei die kundenseitigen Fertigungsmöglichkeiten und die jährlichen Abnahmemengen berücksichtigt, da allen Kunden eine einfache Anpassung an das neue System ermöglicht werden soll. Die Erkenntnis, dass alle Kunden auf eine zweidimensionale Laserbearbeitung bei der Konturerzeugung in der Säulenplatte zurückgreifen, erlaubt eine gewisse Gestaltungsfreiheit in der Konzepterstellung.

Zusammengefasst können aus den aus der Nutzwertanalyse stammenden Konzepten zwei Kategorisierungen vorgenommen werden, wie es in Abbildung 5-13 dargestellt ist. Zudem ist nochmals gezeigt, welche Konzepte in welcher Prototypenphase hergestellt wurden. Eine Variante stellt dabei das Konzept mit der Selbstschneideschraube und dem bestehenden Sechskant der Spindel dar. Dieses Konzept 5.1 bedarf einer Änderung der Aufnahme in der Säule, die vom Kunden vorgenommen werden muss. Bei dieser Modifikation sind die Änderungskosten seitens LOGICDATA gering, da anstatt der

bisherigen metrischen Schraube eine selbstschneidende Schraube eingesetzt wird. Alle anderen Konzepte sehen eine Änderung der Säulenaufnahme und der Spindel vor. Die Spindelfertigung wird für LOGICDATA bei einem Lohnfertiger durchgeführt und würde gegebenenfalls einer Anpassung der mechanischen Bearbeitung an das neue System bedürfen.

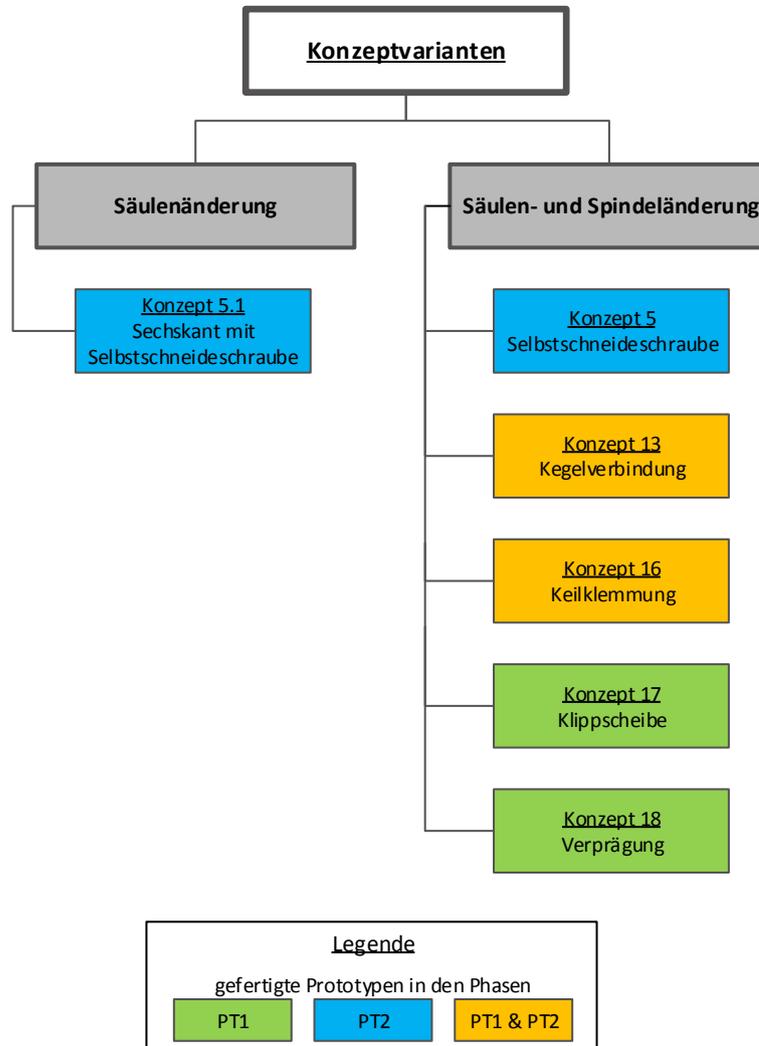


Abbildung 5-13: Unterscheidung der Konzeptvarianten

Die Kosten für die Umstellung der Laserbearbeitung beim Kunden für die Spindelaufnahme würden als Einmalkosten anfallen und somit kein ausschlaggebendes Kriterium für die Auswahl sein. Anders sieht es bei den Assemblierungskosten aus, da je nach Konzept Vorrichtungen benötigt werden. Diese Vorrichtungen schlagen sich bei Kunden mit geringeren Stückzahlen stärker nieder, weshalb bei der Nutzwertanalyse das Kriterium der fixen Kosten für den Kunden eingeführt wurde. Im Nachhinein stellte sich heraus, dass diesem Kriterium deutlich weniger Bedeutung hätte beigemessen werden können, da es auch für Kunden mit geringeren Stückzahlen lohnenswert ist eine Änderung in dem Maße vorzunehmen, um einen Vorteil mit dem neuen System generieren zu können.

6 Prototypen und empirische Versuche

In der letzten Phase der Konzeptdetaillierung, die ausschließlich die Stahlspindelanbindung betrifft, wurden Prototypen von verschiedenen Stahlspindelkonzepten hergestellt. Diese Prototypen entstanden aus der vorangegangenen Konzeptfindung und wurden von den Entwurfskonstruktionen als Fertigungsmodelle abgeleitet, um dadurch qualitative Aussagen über die Eigenschaften der Schnittstelle machen zu können. Dabei wurde die Schnittstelle mit den Mustern auf Festigkeitseigenschaften nach den Spezifikationen getestet und in der Prototypenphase zwei auch anhand des Zusammenbauprozesses analysiert. Im Folgenden wird detaillierter in die beiden Fertigungsphasen sowie die Analysen und Tests mit anschließender Ergebnisinterpretation eingegangen.

6.1 Fertigung von Prototypen

Die Fertigung der Prototypen gliederte sich im Wesentlichen in zwei Phasen. Eine erste Prototypengeneration wurde im Haus selbst gefertigt, um ein Gefühl der Machbarkeit und der Erreichung der Spezifikationen mittels anschließender Tests zu bekommen. Wie in Kapitel 5 beschrieben, wurden die Prototypen zur Herstellung mittels diverser Analyseverfahren ausgewählt. Um alle geforderten und genormten Tests durchführen zu können, wäre es schlussendlich notwendig, Funktionsprototypen zu fertigen. Aus Zeit- und Kostengründen wurden jedoch keine Funktionsprototypen hergestellt. Funktionsprototypen dienen in weiterer Folge zum Testen der Eigenschaften im Gesamtsystem, hier als Tisch, um die Anwendung zu überprüfen. Eine adäquate Abschätzung der geforderten Festigkeitskenngrößen konnte mit den durchgeführten beiden Phasen trotzdem erfolgen.

6.1.1 Phase 1

Für die Stahlspindelanbindung wurde mit einer Prototypenphase begonnen (intern PT 1 genannt). Diese PT 1 Prototypen der ersten Generation wurden bei LOGICDATA im Haus gefertigt. Grund für diese Entscheidung war, dass für manche Konzepte ein schwer abzuschätzendes Risiko hinsichtlich Funktionstüchtigkeit, wie etwa die Momentübertragung oder Zugkraft, bestand. Erwähnt sei, dass nicht alle ausgewählten Konzepte der ersten Prototypenphase gefertigt werden konnten, da die nötigen Voraussetzungen bei der mechanischen Fertigung nicht gegeben waren. Diese Konzepte wurden teilweise in der Prototypenphase zwei (PT 2) realisiert. Nach dem Entscheidungsprozess der Nutzwertanalyse mit dem Ergebnis sechs favorisierter Prototypen wurden lediglich vier Stahlspindelkonzepte für die Fertigung der ersten Phase bestimmt. Für die erste Generation wurden Konzept 13 mit einem Reibkonus, Konzept 16 mit einer Keilklemmung, Konzept 17 mit einer Klippscheibe und Konzept 18 mit einer Verprägung ausgewählt. Bei Konzept 17 handelte es sich um keinen üblichen Prototypen wie bei den anderen, da aufgrund der Verwendung eines Standardteils hier keine Drehmomentübertragung möglich war. Dieses Muster hatte den Hintergrund der Abschätzung der Montage- und Abzugskraft in Abhängigkeit des Bolzendurchmessers. Das Konzept wurde elementar mittels einer Axialsicherungsscheibe untersucht, da es keine Fertigungsmöglichkeiten für ein Stanz-Biegeteil gab. Folgende Bilder zeigen diese Prototypen der ersten Generation (Abbildung 6-1). Ausgangsmaterial war in diesem Fall die Standardspindel des SLIMdrive-660s Antriebes mit einem C15 Einsatzstahl.

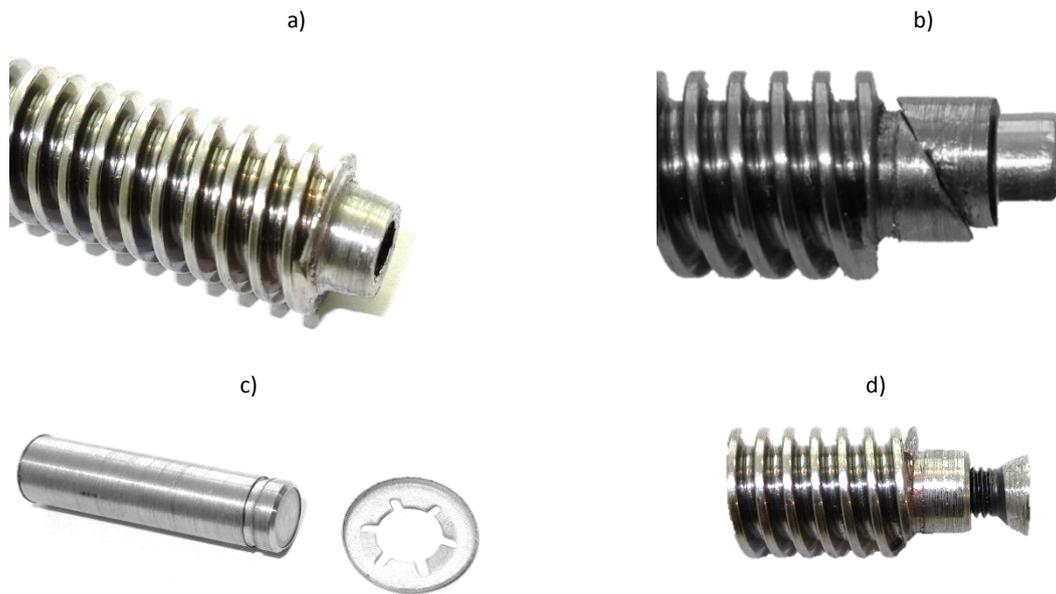


Abbildung 6-1: Prototypen der ersten Generation
a) Konzept 13 Reibkonus 10°
b) Konzept 16 Keilklemmung 30°
c) Konzept 17 Klippscheibe
d) Konzept 18 Verprägung

In Abbildung 6-2 ist ein Rohteil als Nachbildung eines Säulenbodens gezeigt. Die Stärke dieser Platte wurde mit vier Millimeter gewählt, was der Stärke des Säulenbodens in den Spezifikationen des Antriebs entspricht.



Abbildung 6-2: Testobjekt als Nabe für Prototypen der ersten Generation

Für eine grobe Abschätzung des Assemblierens der jeweiligen Verbindung wurde diese Platte verwendet. Der faktische Nutzen über den Assemblierungsprozess ist deshalb gering.

6.1.2 Phase 2

Man führte nachträglich nach der Nutzwertanalyse eine objektive Betrachtungsweise unter Berücksichtigung der Fertigungsmöglichkeiten und Anwendungspotentiale durch; danach wurden vier der sechs Konzepte für die Prototypenherstellung ausgewählt. Das Konzept 17 mit der Klippscheibe wurde nicht als Prototyp hergestellt. Die Entscheidung fiel dagegen aus, da es Schwierigkeiten bei der Abstimmung des Konzeptes gab und man keinen Fertigungspartner zur technischen Unterstützung für den erwarteten Zeitraum finden konnte. Dieses Konzept wurde somit als Vorstudie behalten und kann zu einem geeigneten Zeitpunkt als Prototyp weiterentwickelt werden. Zudem wurde das Konzept 18 mit der Verprägung nachträglich verworfen, da von einer zu großen Parametervariation für den realen Einsatz ausgegangen wurde, was aus den Ergebnissen der ersten Phase stammt. Bei den verbleibenden vier Konzepten ging eine potentielle Verbesserung der Ist-Situation mit Sechskant hervor, weshalb diese erneut als Prototypen für die Fertigung in Auftrag gegeben wurden. Aus den Prototypen der zweiten

Generation (Abbildung 6-3) erwartete man sich aufgrund der höheren Genauigkeit gegenüber der ersten Generation bessere Ergebnisse und Aussagen mittels der Tests. Die Fertigung der zweiten Phase wurde mittels CNC Drehmaschine und Lasercutter durchgeführt, um die realen Verhältnisse möglichst gut nachzubilden.

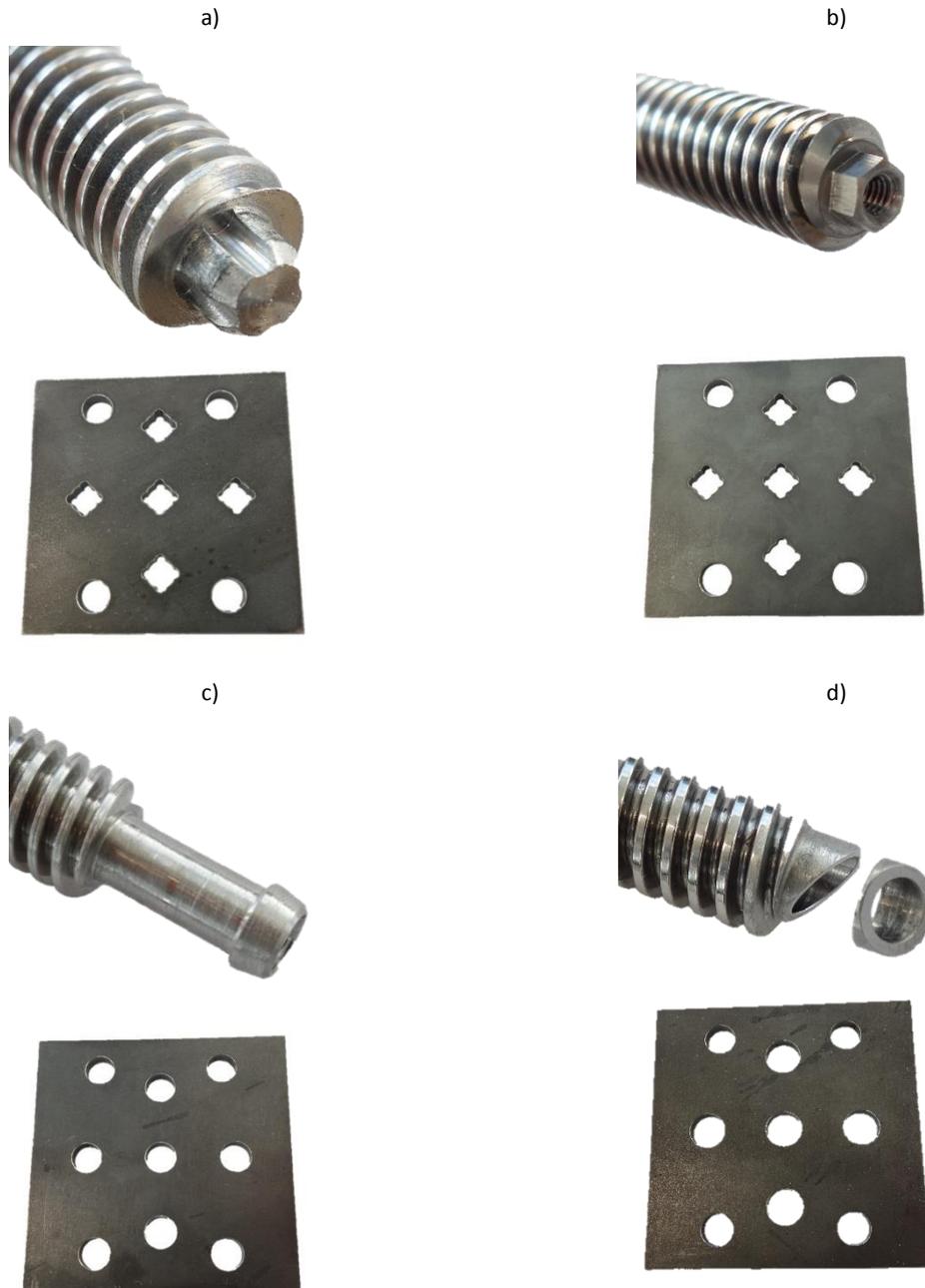


Abbildung 6-3: Prototypen der zweiten Generation

- a) Konzept 5 Selbstschneideschraube
- b) Konzept 5.1 Sechskant mit Selbstschneideschraube
- c) Konzept 13 Kegelformung 10°
- d) Konzept 16 Keilklemmung 30°

Es wurden für jedes Konzept jeweils zwei Stahlspindelteile gefertigt, die von LOGICDATA zur Verfügung gestellt wurden, um Ergebnisse bei gleichen Materialpaarungen zu erhalten. Bei der Säulenplatte wurden insgesamt fünf Nabenbohrungen für Tests vorgesehen. Die weiteren vier Bohrungen dienen für die Montage an die Säule, wie es nachfolgend für die Assemblierung beschrieben ist. Bei Konzept 13

wurden Prototypenteile mit zwei unterschiedlichen Kegelwinkeln gefertigt. Dasselbe wurde bei Konzept 16 gemacht, wo Prototypen mit zwei unterschiedlichen Keilwinkeln gefertigt wurden, um bei den empirischen Versuchen eine bessere Aussagekraft durch eine Parametervariation zu bekommen.

6.2 Einbauprozess

Die Montage des Antriebes in die Säule wurde ausschließlich mit den Prototypen der zweiten Phase durchgeführt.

6.2.1 Bauteilanpassung für die Versuchsdurchführung

Um ein Verbauen des Antriebes mit den PT2 in die Säule nachzustellen, wurde eine Säule dementsprechend präpariert, wo die Möglichkeit bestand die Platten der neuen Anbindungen in der Säule zu testen. Der Säulenboden mit der Sechskantausnehmung wurde angepasst, um ein Durchfädeln der Spindel zu ermöglichen (Abbildung 6-4).



Abbildung 6-4: Präparierte Säule

Dadurch konnten die Platten mit den unterschiedlichen Anbindungsarten an die Säulenplatte der vorgesehenen Tischfußbefestigung geschraubt werden (Abbildung 6-5), wodurch ein Zusammenbau mit der jeweiligen Spindel getestet werden konnte.

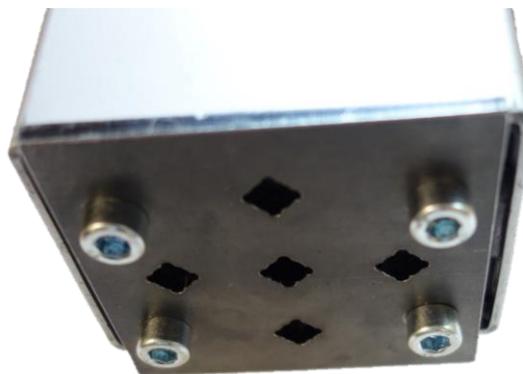


Abbildung 6-5: Säule mit aufgeschraubter Platte

Die Plattenstärke wurde mit vier Millimetern so gewählt, dass diese der derzeitigen Plattenstärke der Säule entspricht. Die Toleranzen der Bohrungen der Platte wurden dementsprechend groß gewählt, dass

beim Zusammenbau zuerst eine Zentrierung über die Kegelspindel erfolgen konnte, um anschließend eine konzentrische Positionierung für das Assemblieren zu erhalten.

6.2.2 Assemblierung von Konzeptprototypen der zweiten Generation

Das formschlüssige Konzept 5 mit der Selbstschneideschraube wies beim Einbau Probleme hinsichtlich der Schraubenpositionierung mit der Winkelteilung der Bohrungen in der Platte und der Säule auf. Ein nachträgliches Verdrehen der Spindel in dem Zustand, wo das Säulenrohr bereits auf der Spindel auflag, erwies sich als nur schwer möglich. Hierfür muss das Rohr etwas angehoben werden, damit ein Verdrehen der Spindel mit einem Werkzeug möglich war. Durch eine dementsprechende Kontur am Ende der Säule ließe sich eine Verdrehmöglichkeit mittels eines geeigneten Werkzeugs ermöglichen. Wurde eine entsprechende Position mit der Bohrungsflucht in der Säule und der Spindel gefunden, so erwies sich das Einschrauben der selbstschneidenden Schraube aufgrund des Formschlusses als unkompliziert. Es wurde jeweils nur eine Schraube zur Befestigung verwendet, da dies dem Grundgedanken mit möglichst wenigen Bauteilen entspricht. Einzig und allein das Handling der kleinen Schrauben in der Größe M2,5 erwies sich als unvorteilhaft im Montageprozess. Die Verbindung wies bei einer verwendeten Schraube etwas Spiel auf, was sich im laufenden Betrieb bemerkbar machen könnte.

Die Idee hinter dem Konzept 5.1 mit der Verwendung des bisherigen Sechskants und einer neuen Kontur in der Säule lag in der erhofften Verbesserung des Montageprozesses in Verbindung mit den nicht notwendigen stahlspindelseitigen Änderungen. Beim Assemblieren zeigten sich jedoch Probleme in der Toleranzabstimmung, weshalb ein Ansetzen der Schraube oftmals schwer möglich war. Hier könnten geeignete Geometrieadjustierungen, wie beispielsweise entsprechende Fasen, Abhilfe schaffen. Nicht zuletzt war das Handhaben der kleinen Teile eine Problematik beim Zusammenbau, wie schon beim vorhin erwähnten Konzept. Zudem führte dies bei zu engen Toleranzen mehrmals zu einem Festigkeitsproblem der Schraube, weshalb es zu einem Abscheren des Schraubenkopfes kam. Ebenso ergab sich hier wieder das Problem wie bei Konzept 5 mit der Teilung und dem folglich schwergängigen Nachdrehen der Spindel im Bedarfsfall. Es sei bei den Konzepten 5 und 5.1 erwähnt, dass eine nicht vorhandene Selbsthemmung der Stahlspindel keine Probleme in Bezug auf ein Reindreihen in den Antrieb verursachte.

Konzept 13 mit einem konischen Schaft wurde in zwei unterschiedlichen Winkeln hergestellt. Gefertigt wurde einmal ein 10° und einmal ein 20° Kegelwinkel, wie in Abbildung 5-4 dargestellt, bei gleichem Bohrungsdurchmesser der Platte. Die Bedenken des Reindreihens der nicht selbsthemmenden Spindel waren unbegründet, da es bei der Auflage des Säulenbodens auf den Konus zu einer anfangs größeren Umfangsreibung kam, als die beim Reindreihen vorherrschenden Reibkraft im Gewinde der rechtsgängigen Schraube. Der Einbauversuch wurde zusätzlich mit einer Spindelmutter in der oberen Toleranzlage durchgeführt. Dies entspricht einer geringeren Selbsthemmung, wo zusätzlich noch der Kontakt von der Spindel zur Platte gefettet wurde, um die Reibung herabzusetzen. Gleichwohl konnte kein Reindreihen der Spindel beim Anziehvorgang der Schraube hervorgerufen werden. Das kraftschlüssige Konzept erwies sich als das am einfachsten zu assemblierende, welches sich vor allem für eine automatisierte Montage durch die nicht inkrementelle Positionierung der Spindel in der Bohrung eignet. Bedingung für die Montage dieses Konzepts ist jedoch ein Kontaktherstellen der Spindel mit der Platte bevor die Schraube in das Gewinde gedreht wird (Abbildung 6-6), um die geforderten Reibverhältnisse für die Schraubenbefestigung herzustellen. Außerdem ist die Abstimmung so zu gestalten, dass eine Kopfaufgabe immer über die Plattenfläche erfolgt. Somit kann eine sichere Momentübertragung durch die Klemmung über den Kegel erfolgen.

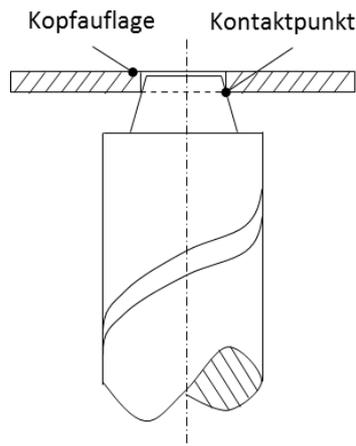


Abbildung 6-6: Kontaktbedingung für Montageprozess

Beim Montageprozess zeichnete sich unter den beiden unterschiedlichen Kegelwinkeln kein Unterschied ab.

Das Konzept 16 mit der Keilklemmung als reibschlüssige Verbindung wurde wie auch das Konzept 13 in zwei Parametervariationen hergestellt. Variiert wurde dabei der Keilwinkel mit einem 20° und 30° Winkel, wie dies in Abbildung 5-6 dargestellt ist. Es zeigte sich beim Einbau ein leichtes Zentrierungsproblem bei der vorassemblierten Spindel, wodurch es zu einem leichten Verklemmen beim Einführen der Spindel kam. Die vorassemblierte Spindel ist per Definition der aufgesetzte Keil auf die Spindel und die eingeschraubte Schraube in das Gewinde im gelockerten Zustand. Durch eine geeignete Geometrieangepassung mittels optimierter Fasen könnte dieses Problem eliminiert werden. Bei diesem Konzept kam die Problematik der nicht vorhandenen Selbsthemmung der Spindel beim Festziehen der Verbindung mittels der rechtsgängigen Schraube zum Vorschein, die zu einem Reindrehen der Spindel führte. Beim Konzept mit dem Keilwinkel von 20° konnte dieser Effekt noch stärker beobachtet werden. Hier kann lediglich ein Linksgewinde mit einer entsprechenden Vorrichtung Abhilfe schaffen.

6.3 Tests

Es wurden ausschließlich statische Tests für diese Prototypen durchgeführt. Für die behandelte Schnittstelle der Stahlspindel in dieser Arbeit sind diese sogenannten dynamischen Tests (dynamische, Gesamtsystem und eingebaut in den Säulen) erst zu einem späterem Zeitpunkt in der Prototypenphase drei vorgesehen. Der Vollständigkeit halber wurden diese Testbedingungen in 3.4.1 (Test als Einzelsystem) erläutert. Für die Prototypenphase der ersten und zweiten Generation wurden zum Testen der Stahlspindel die Spezifikationen aus Tabelle 3-1 (Anforderungen an die Stahlspindelanbindung) herangezogen.

6.3.1 Testaufbau

Testaufbauten wurden jeweils für eine Zugkraftmessung und die Drehmomentermittlung vorgenommen.

6.3.1.1 Zugkraftermittlung

In Abbildung 6-7 ist der Versuchsaufbau zur Ermittlung der Axialkraft beziehungsweise Druckkraft gezeigt. Dieser hier gezeigte Aufbau bildet den Test der Zugkraft nach. Der Test wird in einer hydraulischen Presse durchgeführt, wo die axiale Kraft mittels eines Kraftsensors ermittelt wird. Hierbei werden die Stahlplatten mit den jeweiligen Nabenkonturen auf die Quertraverse der Presse gelegt und

anschließend mittels eines hydraulischen Zylinders axial belastet. Dabei entspricht die ermittelte Kraft F als Maximalkraft der maximal übertragbaren Zugkraft der Verbindung. Die Auswertung erfolgte über das elektronische Messprogramm Dewesoft.

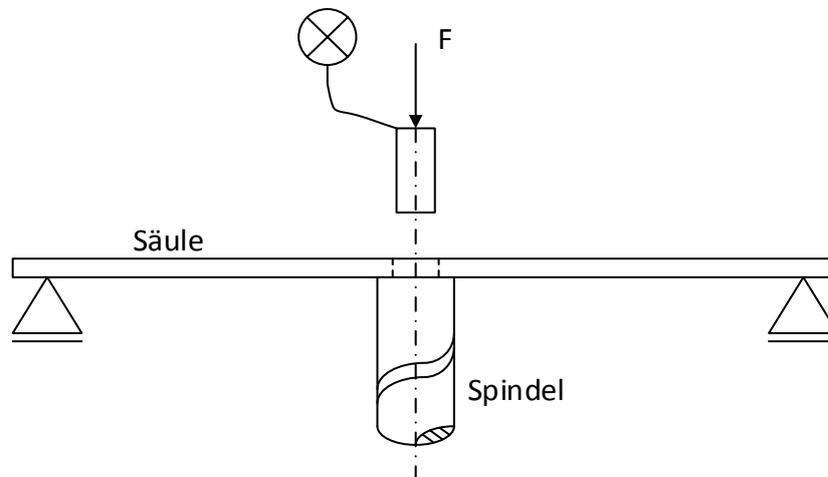


Abbildung 6-7: Versuchsaufbau zur Axialkraftmessung

6.3.1.2 Drehmomentermittlung

Für die Drehmomentmessung der ersten Prototypengeneration wurde der Prüfling drehfest in eine Vorrichtung eingespannt und anschließend eine Kraft in einem bestimmten Abstand aufgebracht. Durch ein Umrechnen der Kraft F und der Länge L konnte das entsprechende maximale Drehmoment ermittelt werden.

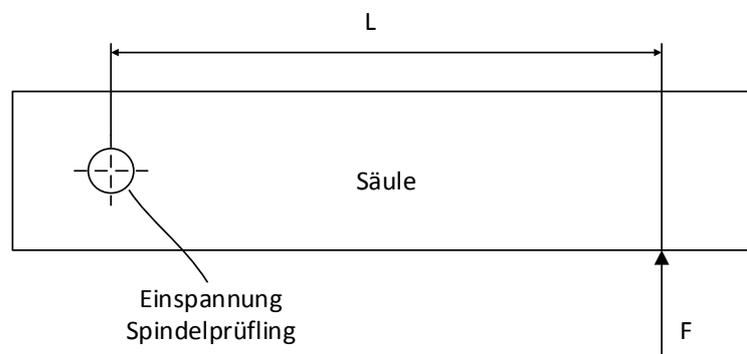


Abbildung 6-8: Versuchsaufbau zur Drehmomentmessung für die erste Prototypengeneration

Zur Drehmomentermittlung bei den Prototypen der zweiten Generation wurde ein Drehmomentschlüssel eingesetzt, was über die Aufnahme des Sechskantes der bisherigen Stahlspindel erfolgte. Die Stahlplatte wurde dabei rotationsfest in einen Schraubstock eingespannt (Abbildung 6-9). Das maximal messbare Drehmoment war durch das Messgerät mit 14 Nm begrenzt.

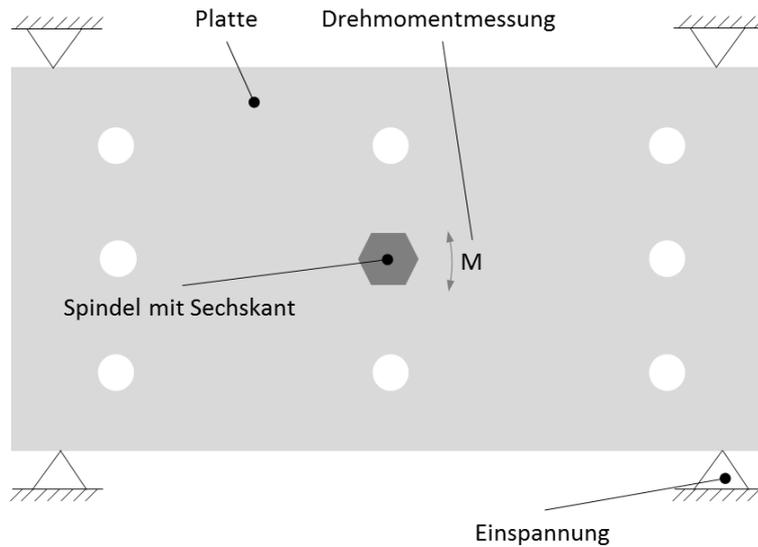


Abbildung 6-9: Versuchsaufbau zur Drehmomentmessung für die zweite Prototypengeneration

6.3.2 Versuchsergebnisse mit erster Prototypengeneration

Für die erste Prototypengeneration wurden die vier Konzepte auf die statischen Werte der Zugkraft und des Drehmoments gemessen. Die Messung der Zugkraft erfolgte mit einer axialen Kraftmessdose mit Querkraftkompensation über die Betätigung einer hydraulischen Presse (Abbildung 6-10), wo die Auspresskraft als Druckkraft, die letztendlich der Zugkraft entspricht, ermittelt wurde. Die Anforderungen sind das Standhalten einer Zugkraft von 500 N und ein Drehmoment von 3 Nm, wie dies bereits unter den Testszenarien der Stahlspindelanbindung in Tabelle 3-1 erwähnt wurde.

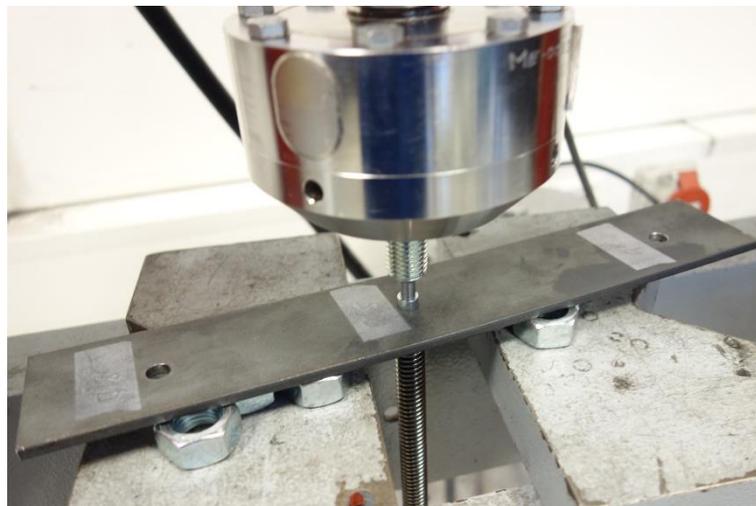


Abbildung 6-10: Auspressversuch als Zugkraftmessung

Das Drehmoment wird durch Aufbringen einer Kraft von Hand mittels eines Kraftsensors auf die Platte und des wirkenden Hebelarms ermittelt. Trotz der Ungenauigkeit der angewandten Messmethode konnte eine erste grobe Abschätzung des Drehmoments der einzelnen Prototypen erfolgen.



Abbildung 6-11: Drehmomentversuch über Kraftmessung

Folglich zeigt Tabelle 6-1 die ermittelten Ergebnisse der vier getesteten Konzepte der ersten Prototypenphase. Es wurde lediglich ein Test durchgeführt, da aufgrund der Fertigungstoleranzen und der Versuchsmethoden die Prototypen teils stark beschädigt wurden.

Tabelle 6-1: Testergebnisse der ersten Prototypengeneration

	Konzept 13 (Reibkonus)	Konzept 16 (Keilklemmung)	Konzept 17 (Starlockscheibe)	Konzept 18 (Verprägung)
Drehmoment [Nm]	2,25	2,65	-	2
Zugkraft [N]	-	1100	2840	4850

Beim Konzept 13 mit Reibkonus konnte das geforderte Drehmoment nicht erreicht werden. Begründet wird dies durch die geometrische Abstimmung sowie die großen Fertigungsungenauigkeiten, was auf die Eigenfertigung zurückzuführen war. Der Zugkrafttest wurde nicht durchgeführt, da der Kraftfluss der Verbindung lediglich über die Schraube erfolgt und die Zugkraft bei einer M6 Schraube der Festigkeitsklasse 8.8 bei 16.100 N [24] liegt.

Das kraftschlüssige Konzept 16 wurde mit einem Keilwinkel von circa 30° gefertigt. Mit diesem Prototyp konnte das geforderte Drehmoment nicht erreicht werden. Hier schließt man speziell auf die große Oberflächenrauheit, wo es zu einer Glättung der Spitzen kam und als Folge eine geringere Reibkraft übertragen werden konnte. Die maximale Zugkraft konnte mit einem doppelt so großen Wert wie gefordert ermittelt werden. Da der Einfluss auf die Kraftübertragung von Interesse ist, wurden bei der zweiten Prototypengeneration zwei verschiedene Keilwinkel gefertigt.

Konzept 17 bildet eine Ausnahme unter diesen vier Konzepten, da mit einer als Normteil verwendeten Axialsicherungsscheibe keine Drehmomentübertragung möglich war. Hierbei war es interessant ein Gefühl über die Fügekraft und die tatsächlich vorhandene Zugkraft beim Auspressversuch zu bekommen. Bei diesem Konzept zeigte sich, dass die Fügekraft sehr stark von den Toleranzen abhängig ist, was wiederum die Zugkraft beeinflusst. Beim Prototyp waren Fügekräfte im Bereich von 1000 N notwendig, was ohne Vorrichtungen nahezu unmöglich umzusetzen ist.

Die höchste Zugkraft wurde bei Konzept 18 ermittelt hingegen das geringste Drehmoment. Kritisch ist die Abstimmung der Wandstärke der Säule, die über den optimierten konischen Schraubenkopf verformt wird. Ist diese Wandstärke zu groß ausgelegt, so wird die Schraubenzugkraft überschritten, die zum Verformen notwendig wäre.

6.3.3 Versuchsergebnisse mit zweiter Prototypengeneration

Für die Tests wurde der zuvor beschriebene Sechskant der Stahlspindel genutzt, um eine einfachere Anbindung der Stahlspindelteile mit dem Drehmomentmessgerät zu ermöglichen (Abbildung 6-12).



Abbildung 6-12: Drehmomentmessung für die zweite Prototypengeneration

Abbildung 6-13 zeigt den Sechskant am Ende der Spindel für eine einfache Anbindung zum Messen des Drehmoments. Das M8 Gewinde ist für etwaige Einspannzwecke für Versuchsdurchführungen angedacht.



Abbildung 6-13: Sechskant zur Messung des Drehmoments

Die Zugkraftbestimmung erfolgte, wie bereits von der ersten Serie bekannt ist, mittels eines Kraftsensors und einer hydraulischen Presse.

Insgesamt wurden mit jedem Prototypen drei Tests durchgeführt, um Änderungen in der Kraft- und Momentübertragung feststellen zu können. Im Grunde genommen wurden bei allen drei Testdurchgängen mit denselben Prototypen ähnliche Werte gemessen (Tabelle 6-2).

Tabelle 6-2: Testergebnisse der zweiten Prototypengeneration

		Konzept 5 (Selbstschneideschraube)	Konzept 5.1 (Sechskant mit Selbstschneideschraube)	Konzept 13 (Kegelverbindung)		Konzept 16 (Keilklemmung)	
1. Testdurchgang	Variante	1 Schraube	1 Schraube	10°	20°	20°	30°
	Drehmoment [Nm]	14 ¹⁾	4,5 ²⁾	10 ³⁾	8 ⁵⁾	2,2	4,1
	Zugkraft [N]	1990	550	-	-	111	1539
2. Testdurchgang	Variante	1 Schraube	1 Schraube	10°	20°	20°	30°
	Drehmoment [Nm]	14 ¹⁾	4 ²⁾	8 ³⁾⁴⁾	-	1,4	4,6
	Zugkraft [N]	1503	512	-	-	205	1767
3. Testdurchgang	Variante	1 Schraube	1 Schraube	10°	20°	20°	30°
	Drehmoment [Nm]	14 ¹⁾	4 ²⁾	10 ⁴⁾⁵⁾	-	1,64	3,6
	Zugkraft [N]	2401	527	-	-	338	2666

¹⁾ begrenzt durch Messmittel

²⁾ begrenzt durch Testverfahren

³⁾ begrenzt durch Schaftfestigkeit der Spindel

⁴⁾ gefetteter Zustand

⁵⁾ Versagen des Schafts der Spindel

Bei Konzept 5 mit einer selbstschneidenden M2,5 Schraube konnten Zugkraftwerte zwischen 1503 N und 2401 N erzielt werden, weshalb kein Test mit zwei Schrauben notwendig war. Die Bestimmung des Drehmoments war mit 14 Nm begrenzt, da dies der maximale Messbereich des Messwerkzeuges war. Bei jedem neuen Testversuch wurden eine neue Schraube und eine neue Bohrungsstelle der Spindel und Platte genutzt.

Im Vergleich dazu wurden bei Konzept 5.1 mit dem Sechskant deutlich geringere Zugkraftwerte gemessen. Diese Werte lagen nur knapp über der geforderten Spezifikation von 500 N. Die Drehmomentmessung erfolgte hier mittels einer M4 Sechskantschraube, die stirnseitig beim Sechskant in die Spindel geschraubt wurde, da hier keine Bearbeitung der Spindel am anderen Ende stattfand. Somit war hier das maximale Drehmoment auf 4 Nm aufgrund der Schraubenfestigkeit begrenzt. Die Schnittstelle selbst zeigte bei diesem Wert keine Versagenserscheinungen.

Die erneut ausgewählte Kegelverbindung wurde in zwei Varianten gefertigt, um gegebenenfalls einen Einfluss des Winkels erkennen zu können. Auf zwei Varianten einigte man sich, da bei den Prototypen der ersten Generation das geforderte Drehmoment nicht erreicht werden konnte. Hier wurde bei allen drei Versuchen das Maximalmoment durch die Festigkeit des Schafts der Spindel begrenzt. Es sei erwähnt, dass aufgrund der Bedenken bei Vorliegen undefinierter Reibverhältnisse durch Schmierfett, der zweite und dritte Drehmomentversuch in einem gefetteten Zustand erfolgte. Hier konnte im Messbereich kein Abfallen des übertragbaren Moments ermittelt werden. Der Zugkrafttest war wie schon bei der ersten Prototypengeneration irrelevant, da die maximale Zugkraft von der einer M6 Schraube der Festigkeitsklasse 8.8 abhängt und somit eine vielfach höhere Kraft übertragen werden kann. Es konnte in dem Messbereich kein Unterschied der beiden unterschiedlichen Flankenwinkelvarianten erkannt werden.

Einen großen Einfluss der Parametervariation des Keilwinkels konnte bei Konzept 16 beobachtet werden. Hier zeigte sich, dass der Prototyp mit dem flacheren Winkel weder das geforderte Drehmoment noch die Zugkraft erreichen konnte. Die gemessenen Werte des Drehmomentes lagen ungefähr um einen Faktor zwei auseinander, und bei der Kraft unterschieden sich beide Varianten um den Faktor zehn. Hier wurden alle drei Tests ohne Fetteinflüsse durchgeführt. Diese könnten sich auf der Keilfläche positiv auf die Klemmkraft auswirken und negativ auf der Mantelfläche der Zylinder zur Kraftübertragung. Ein Plot der Kraft über die Zeit eines Auszugversuchs von Konzept 16 mit 30° Keilwinkel ist im Anhang 16 gezeigt. Bei dem gezeigten Versuch gibt es global zwei Spitzen, wovon die zweite die maximale Kraft darstellt und der erste eventuell ein Nachsitzen der Verbindung bis zum weiteren Kraftanstieg sein könnte. Die Maximalkraft ist aus dem Kraftanstieg mit dem darauffolgenden Abfallen ersichtlich.

7 Schlussbetrachtung

Die Motivation dieser Diplomarbeit ging aus der Problematik des Assemblierens eines mechatronischen Antriebes in eine Säule hervor, was beim Kunden geschieht. Für die Anbindung des Antriebes an die Säule gibt es drei Schnittstellen: Motoranbindung, Mittenrohranbindung und Stahlspindelanbindung. In dieser Diplomarbeit wurde die Anbindung der Stahlspindel an den Säulenboden betrachtet und außerdem auf die Verdrehsicherung der Stahlspindel aufgrund des nicht selbsthemmenden Bewegungsgewindes eingegangen. Die Mittenrohranbindung befindet sich wegen des schwer kontrollierbaren Fügeprozesses aufgrund der vielen Parameter beim beauftragenden Unternehmen in Überarbeitung, was jedoch nicht Teil dieser Arbeit ist. Bei der Motoranbindung bestand kein Handlungsbedarf zur Überarbeitung.

Die Vorgehensweise in der Arbeit lehnte sich an die Vorgehensweise für methodisches Konstruieren nach VDI Richtlinie 2221 an. Aus dem Systems Engineering fand der Problemlösungszyklus als Mikroanalyse in der Konzeptphase Anwendung, sowie wurde generell die Betrachtungsweise vom Groben zum Detail angewendet. Für die Makroanalyse erwies sich für ein mechatronisches Unternehmen wie LOGICDATA das V-Modell als hilfreich.

Im konkreten Fall lautete die Forderung an den gesamten Einbau und somit an alle Schnittstellen, dass eine Drop&Drive Lösung, sprich einfache Montage, im günstigsten Fall in Verbindung mit einer Automatisierung möglich sein sollte. Mit dem derzeitigen Konzept des Sechskants am Ende der Stahlspindel ist die geforderte Montage nicht möglich, da es sich in erster Linie um eine inkrementelle, also winkelabhängige Positionierung handelt und zudem eine nachträgliche Justierung der Spindel nach Aufsetzen des Säulenrohrs nur schwer möglich ist. Generell gibt es zwei verschiedene Marktsituationen, wo am amerikanischen Markt eine möglichst geringe minimale Bauhöhe gefordert wird und andererseits am europäischen Markt, in Richtung Maximalhöhe tendiert wird. Somit kommen bis dato unterschiedliche Methoden zum Einsatz, um möglichst viele Kunden in unterschiedlichen Märkten bedienen zu können. Bei europäischen Kunden wird die Sechskantanbindung zum Befestigen eines Adapters genutzt, um die unterschiedlichen Einbauhöhen der Säulenlängen abzudecken und somit Spindeln nicht in unterschiedlichen Längen fertigen zu müssen. Kunden, bei denen die Antriebslänge nicht entscheidend ist, verwenden trotzdem Adapterlösungen, um eine einfachere Einbausituation zu erhalten. Das läuft auf die nächste Forderung seitens des Unternehmens LOGICDATA hinaus, wo angestrebt wird, die Variantenvielfalt auch mit den teils mitgelieferten Adaptern so gering wie möglich zu halten und nach Möglichkeit sogar zu reduzieren. Für den amerikanischen Kunden bietet sich keine Adapterlösung an, weshalb der Sechskant formschlüssig über eine dementsprechende Nabenaufnahme in der Säule mit der Stahlspindel verbunden wird. Des Weiteren soll darauf geachtet werden, dem Kunden eine stets kostengünstige Lösung anbieten zu können, was unter Einbezug der einfachen Montage als best package bezeichnet wurde.

In Verbindung mit dem erschwerten Einbau der Spindel in die Säule, aufgrund der Ausrichtung, steht die nicht selbsthemmende Spindel. Diese wird bei Auslieferung auf eine definierte Einbaulänge eingestellt, was auch eine Positionsausrichtung der Anbindungsstelle in der Säule erfordert. Kommt es aufgrund des Transportes oder des Handlings während der Montage zu einem selbsttätigen Verdrehen der Spindel, so wird ein einfaches Assemblieren durch Einführen des Antriebes in die Säule unmöglich.

Anhand der Benchmarkanalysen auf Mitbewerber- sowie auf Kundenseite wurden unter Anwendung verschiedener Kreativitätstechniken Konzepte für die Stahlspindelanbindung als auch für die Fixierung der Spindel erstellt. Vielversprechende Konzepte der Stahlspindelanbindung entstanden aus der

Synthese und wurden anschließend als CAD-Modelle erstellt, um einfachere Modifikationen und einen besseren Visualisierungsgrades zu ermöglichen. Es wurden die Konzepte von diversen Personen aus unterschiedlichen Bereichen bei LOGICDATA mittels verschiedener Bewertungsverfahren bewertet und so für eine Fortsetzung in eine nächste Phase ausgewählt beziehungsweise verworfen. Im Vorhinein wurden dafür entscheidende Kriterien definiert, die vor allem aus den Spezifikationen des Lastenhefts für die Anbindungen hervorgingen. Anhand des paarweisen Vergleichs wurde die Gewichtung dieser Kriterien bestimmt, um für nachfolgende Bewertungsanalysen zu dienen. Zudem wurde für die Konzepte eine vorab Design FMEA durchgeführt, um Probleme und deren Auswirkungen durch geeignete Maßnahmen abstellen zu können.

Für die Stahlspindelanbindung wurden ausgehend von den Bewertungsverfahren die vielversprechendsten Konzepte für ein Vorantreiben in eine weitere Phase ausgewählt, was unter anderem die Fertigung von Prototypen beinhaltet. Die Prototypen der ersten Phase wurden bei LOGICDATA gefertigt, um eine grobe Aussage über deren Potentiale mit den Risiken tätigen zu können. Folglich wurde eine zweite Prototypenphase gestartet, die eine externe Fertigung der Teile enthielt. Von den sechs ausgewählten Konzepten für eine Prototypenherstellung wurden insgesamt vier realisiert, wovon zwei Konzepte aus der ersten Generation fortgesetzt wurden. Bei den Prototypen der zweiten Generation wurde außerdem eine Optimierung hinsichtlich der Säulen- und Plattenaufnahme der jeweiligen Konzepte vorgenommen, für die Nachstellung des realen Assemblierungsprozesses und somit für eine Bewertung dessen.

Die Prototypen beider Generationen wurden anhand der spezifizierten Anforderung hinsichtlich Zugkraft- und Drehmomentübertragung getestet. Eine Messung der geforderten Druckkraft wurde nicht durchgeführt, da es aufgrund der Kraftabstützung über die Wellenschulter zu keinen Beanspruchungen im festigkeitsgefährdeten Bereich kam. Bei den Prototypen der zweiten Generation erfüllten drei der vier hergestellten Konzepte die Anforderungen hinsichtlich Drehmoment und Zugkraft bei allen drei Versuchswiederholungen. Die formschlüssigen Konzepte mit den Selbstschneideschrauben erfüllen zwar die Anforderung, jedoch erwies sich die Handhabung der kleinen Teile im Assemblierungsprozess als unvorteilhaft. Zusammengefasst sei gesagt, dass sich das Konzept mit dem Reibkonus als kraftschlüssige Variante für einen automatisierten Assemblierungsprozess gut eignet. Auch waren die Kraft- und Drehmomentmessergebnisse mit einem großen Sicherheitsfaktor gegenüber den Anforderungen behaftet, unabhängig von den vorliegenden Reibverhältnissen der Verbindung. Bei diesem Konzept ist auch eine Verwendung von Adaptern möglich, um die minimale Bauhöhe zu erhöhen. Ansonsten ist keine Adapterlösung notwendig, um bei gleicher Bauhöhe einen einfacheren Montageprozess zu erhalten, weshalb die Variantenvielfalt bei dieser Kundenschicht auf der Seite von LOGICDATA reduziert wird.

Für die Transportsicherung konnte ein Konzept, gemäß den Anforderungen ohne ein zusätzliches Bauteil zu verwenden, gefunden werden. Eine Prototypenfertigung ist bei Umstellung des Spritzgusswerkzeuges geplant. Beim Mittenrohradapter befindet sich das gezeigte Konzept in der finalen Phase, das nach Bestehen der Prototypentest in Serie gehen könnte.

Literaturverzeichnis

- [1] LOGICDATA, *SLIMdrive-660s Datenblatt*, Deutschlandsberg: LOGICDATA Software Entwicklungs GmbH, Rev0.
- [2] LOGICDATA, *SLIMdrive-660S Bedienungsanleitung*, Deutschlandsberg: LOGICDATA Software Entwicklungs GmbH, Rev0.
- [3] M. Bader, *Entwicklungsmethodik*, Graz: Institut für Maschinenelemente Technische Universität Graz, 2015.
- [4] M. Seidel, *Methodische Produktplanung*; Dissertation, Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe, 2005.
- [5] V. D. Ingenieure, *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme VDI 2206*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2004.
- [6] R. Haberfellner, O. de Weck, E. Fricke und S. Vössner, *Systems Engineering Grundlagen und Anwendung*, 13 Hrsg., Zürich: Orell Füssli Verlag AG, 2015.
- [7] B. Fleischer und H. Theumert, *Entwickeln Konstruieren Berechnen*, 2 Hrsg., Wiesbaden: Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, 2009.
- [8] Memecon, „Memecon,“ 2011. [Online]. Available: <http://www.memecon.de/systemkomplexitaet.html>. [Zugriff am 26. Juni 2017].
- [9] O. Gassmann und P. Sutter, *Praxiswissen Innovationsmanagement*, 3 Hrsg., München: Carl Hanser Verlag, 2013.
- [10] M. Bader, *Entwicklungsmethodik Case Study Systemanalyse*, Graz: Institut für Maschinenelemente Technische Universität Graz, 2015.
- [11] V. D. Ingenieure, *Konstruktionsmethodik Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien VDI 2222*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1997.
- [12] N. Gustav, H. Winter und B.-R. Höhn, *Maschinenelemente Band 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen*, 4. Auflage Hrsg., Berlin Heidelberg: Springer, 2005.
- [13] R. Haberfellner, P. Nagel, M. Becker, A. Büchel und H. von Massow, „Projekt-Management auf der Basis des Systems Engineering,“ in *Systems Engineering Methodik und Praxis*, R. Haberfellner, Hrsg., Zürich, Verlag Industrielle Organisation Zürich, 2002, p. Konzentrat des Buches.
- [14] J. B. Kühnapfel, *Nutzwertanalysen in Marketing und Vertrieb*, Wiesbaden: Springer Gabler, 2014.
- [15] D. Gross, W. Hauger, J. Schröder und W. A. Wall, *Technische Mechanik 1 Statik*, 9. Auflage Hrsg., Berlin Heidelberg: Springer, 2006.

- [16] K. Kabus, Decker Maschinenelemente Funktion, Gestaltung und Berechnung, 15. Auflage Hrsg., Leipzig: Hanser, 2000.
- [17] V. D. Ingenieure, Selbsthemmende und selbstbremsende Getriebe, Berlin: Beuth, 1991.
- [18] B. Künne, Köhler/Rögnitz Maschinenelemente 1, 9. Auflage Hrsg., Wiesbaden: B. G. Teubner/GWV Fachverlage GmbH, 2003.
- [19] P. Polz, Entwicklung eines Prognosemodells zur Bestimmung von Spindelwirkungsgraden mit Hilfe von statistischer Versuchsplanung, Graz: Diplomarbeit an der Technischen Universität Graz, 2015.
- [20] LINAK GmbH, „LINAK,“ April 2017. [Online]. Available: <https://ipaper.ipapercms.dk/Linak/GERMAN/BEDIENUNGSANLEITUNG/DesklineDB5DB6Bedienungsanleitungdt/>. [Zugriff am 20. Oktober 2017].
- [21] B. KETTERER Söhne GmbH & Co. KG, „KETTERER Antriebe,“ [Online]. Available: https://www.ketterer.de/files/3120_inlineantrieb.pdf. [Zugriff am 10. Juli 2017].
- [22] A. N. S. f. O. a. I. Furnishings, „Desk/Table Products-Tests,“ BIFMA, Grand Rapids US, 2014-02.
- [23] Ö. Normungsinstitut, „Büromöbel - Büro-Arbeitstische Teil 3: Prüfverfahren für die Bestimmung der Standsicherheit und der mechanischen Festigkeit der Konstruktion,“ Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2003-05.
- [24] Bossard, „Engel,“ Juni 2012. [Online]. Available: <https://www.engel.ch/fileadmin/inhalte/pdf-de/produkte/eisenwaren/Schrauben%20Technische%20Informationen.pdf>. [Zugriff am 12. Oktober 2017].

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Systemkontext zur Antriebseinheit.....	1-1
Abbildung 1-2: Control-Box SMARTeco+	1-2
Abbildung 1-3: Handset TOUCHdown.....	1-2
Abbildung 1-4: Systemabgrenzung.....	1-3
Abbildung 1-5: Single-stage Antrieb SLIMdrive-500	1-4
Abbildung 1-6: Dual-stage Antrieb SLIMdrive-660s.....	1-4
Abbildung 1-7: Dual-stage Antrieb LOGICdrive-660	1-4
Abbildung 1-8: Säule mit Antrieb als Thick-End-Down Variante	1-5
Abbildung 1-9: Prototyp eines höhenverstellbaren Bürotisches.....	1-5
Abbildung 1-10: Stahlspindelanschluss [2].....	1-7
Abbildung 1-11: Stahlspindel- und Bodenplattendesign [2]	1-7
Abbildung 1-12: Längeneinstellung Stahlspindel [2]	1-8
Abbildung 1-13: Längeneinstellung Mittenrohr [2]	1-8
Abbildung 1-14: Anbindungspunkte eines dual-stage Antriebes	1-10
Abbildung 1-15: Schematische Vorgehensweise [4, p. 3]	1-12
Abbildung 2-1: Problemlösungszyklus als Mikroanalyse [6, p. 72].....	2-14
Abbildung 2-2: Systemkomplexität [8, p. 1]	2-16
Abbildung 2-3: Makrozyklus nach dem V-Modell nach der VDI 2206 Richtlinie [5, p. 29]	2-19
Abbildung 2-4: Vorgehensweise für methodisches Konstruieren nach VDI 2221 [11, p. 5]	2-21
Abbildung 2-5: Konstruktionsarten und Konstruktionsphasen nach Aufgabenstellung [12, p. 12]	2-22
Abbildung 2-6: Top-down Betrachtungsweise [6, p. 59].....	2-23
Abbildung 2-7: Stufenweise Variantenbildung und Ausscheidung.....	2-24
Abbildung 3-1: Abstrahierung der Antriebseinheit auf elementare Funktionen	3-26
Abbildung 3-2: Abwicklung einer Schraubenlinie bei einem eingängigen Gewinde	3-27
Abbildung 3-3: Reibkraftmodell an einer schiefen Ebene	3-28
Abbildung 3-4: Kräfte am Flachgewinderast	3-29
Abbildung 3-5: Kräfte am Spitzgewinde.....	3-30
Abbildung 3-6: Inline-Antriebslayout (LOGICDATA)	3-31
Abbildung 3-7: 90°-Antriebslayout in Winkelbauweise (LINAK) [20].....	3-31
Abbildung 3-8: Single-stage Antrieb in nicht koaxialer Bauweise (KETTERER) [21].....	3-31
Abbildung 3-9: Dual-stage Antrieb SLIMdrive-660s mit Synchronverstellung	3-32
Abbildung 3-10: Dual-stage Antriebe in der Säule eingebaut	3-33
Abbildung 3-11: System mit Sechskantspindel und Nabe.....	3-34

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-12: Winkelteilung für Positionierung	3-34
Abbildung 3-13: Bauraumanforderung an die Stahlspindelanbindung	3-35
Abbildung 3-14: Ursprünglicher Mittenrohradapter	3-36
Abbildung 3-15: Antrieb mit Mittenrohradapter	3-36
Abbildung 3-16: Antrieb für Thick-End-Up Montage	3-36
Abbildung 3-17: Statischer Falltest	3-38
Abbildung 3-18: Fallprüfung nach der europäischen Norm [23, p. 11]	3-40
Abbildung 4-1: Antrieb mit Sechskantverbindung ohne Adapter	4-41
Abbildung 4-2: Säulensystem mit Adapter zur Längenanpassung und Montageerleichterung.....	4-42
Abbildung 4-3: Säulensystem mit optimierter Einbaulänge	4-42
Abbildung 4-4: Spindelanbindungssystem für eine einfachere Montage am europäischen Markt.....	4-43
Abbildung 4-5: Spindelanbindung mit Adapter für eine automatisierte Montage	4-43
Abbildung 4-6: Stahlspindelanbindung mit Bandantrieb.....	4-44
Abbildung 4-7: Spindelanbindung mittels Vielzahnverbindung	4-45
Abbildung 4-8: Spindelanbindung über Kegelerbindung	4-46
Abbildung 4-9: Transportsicherung	4-47
Abbildung 4-10: Einstellvorgabe der Spindel mit dem Teflonband	4-47
Abbildung 4-11: Antrieb ohne und mit verclippten Mittenrohradapter	4-48
Abbildung 4-12: Kundenadapter	4-48
Abbildung 4-13: Mittenrohradapter	4-49
Abbildung 4-14: Antriebsanbindung an die Top-Plate.....	4-50
Abbildung 4-15: Motorseitige Anbindung.....	4-50
Abbildung 4-16: Assemblierungsprozess	4-51
Abbildung 5-1: Stahlspindelkonzept Selbstschneideschraube (Konzept 5)	5-53
Abbildung 5-2: Stahlspindelkonzept Selbstschneideschraube mit Sechskant (Konzept 5.1).....	5-54
Abbildung 5-3: Stahlspindelkonzept Kegelerbindung (Konzept 13)	5-55
Abbildung 5-4: Variation des Flankenwinkels	5-55
Abbildung 5-5: Stahlspindelkonzept Keilklemmung (Konzept 16)	5-56
Abbildung 5-6: Variation des Steigungswinkels.....	5-57
Abbildung 5-7: Stahlspindelkonzept Klippscheibe (Konzept 17)	5-57
Abbildung 5-8: Verprägung (Konzept 18).....	5-58
Abbildung 5-9: Spindelbremsfunktion durch Spritzgussverfahren.....	5-59
Abbildung 5-10: Konzept Mittenrohranbindung	5-60
Abbildung 5-11: Mittenrohranbindung mit verbautem Adapterstück	5-60
Abbildung 5-12: Steghöhe Mittenrohradapter	5-61

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 5-13: Unterscheidung der Konzeptvarianten	5-68
Abbildung 6-1: Prototypen der ersten Generation.....	6-70
Abbildung 6-2: Testobjekt als Nabe für Prototypen der ersten Generation.....	6-70
Abbildung 6-3: Prototypen der zweiten Generation	6-71
Abbildung 6-4: Präparierte Säule.....	6-72
Abbildung 6-5: Säule mit aufgeschraubter Platte.....	6-72
Abbildung 6-6: Kontaktbedingung für Montageprozess.....	6-74
Abbildung 6-7: Versuchsaufbau zur Axialkraftmessung	6-75
Abbildung 6-8: Versuchsaufbau zur Drehmomentmessung für die erste Prototypengeneration	6-75
Abbildung 6-9: Versuchsaufbau zur Drehmomentmessung für die zweite Prototypengeneration	6-76
Abbildung 6-10: Auspressversuch als Zugkraftmessung.....	6-76
Abbildung 6-11: Drehmomentversuch über Kraftmessung	6-77
Abbildung 6-12: Drehmomentmessung für die zweite Prototypengeneration	6-78
Abbildung 6-13: Sechskant zur Messung des Drehmoments.....	6-78

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Technische Daten SLIMDrive-660s [1]	1-6
Tabelle 3-1: Anforderungen an die Stahlspindelanbindung.....	3-37
Tabelle 3-2: Fallhöhe nach Gewichtsklasse gemäß US-Norm [22, p. 50].....	3-39
Tabelle 3-3: Ermittlung der Fallhöhe nach EN 527-3 [23, p. 10]	3-39
Tabelle 5-1: Auszug aus dem paarweisen Vergleich.....	5-62
Tabelle 5-2: Auszug aus der Nutzwertanalyse für die Sechskantspindel	5-64
Tabelle 6-1: Testergebnisse der ersten Prototypengeneration	6-77
Tabelle 6-2: Testergebnisse der zweiten Prototypengeneration	6-79

Anhangverzeichnis

Anhang 1: Baulängenvergleich der Antriebe.....	90
Anhang 2: Stahlspindelkonzept Sternring	91
Anhang 3: Stahlspindelkonzept Sicherungsring	91
Anhang 4: Stahlspindelkonzept Kerbverzahnung	92
Anhang 5: Stahlspindelkonzept Pressverband	92
Anhang 6: Stahlspindelkonzept Reibschlussverbindung.....	93
Anhang 7: Stahlspindelkonzept Reibkonus mit Innengewinde	93
Anhang 8: Stahlspindelkonzept Befestigungsclip	94
Anhang 9: Stahlspindelkonzept Rändelreibklemmung	94
Anhang 10: Paarweiser Vergleich Auswertung gesamt	95
Anhang 11: Paarweiser Vergleich Auswertung Mechatronik.....	96
Anhang 12: Paarweiser Vergleich Auswertung Field Application.....	97
Anhang 13: Paarweiser Vergleich Auswertung Sales und Product Line Management.....	98
Anhang 14: Nutzwertanalyse Konzepte Stahlspindel	99
Anhang 15: Auszug aus Design-FMEA.....	101
Anhang 16: 1. Auszugversuch Stahlspindelprototyp Konzept 16 30°	102

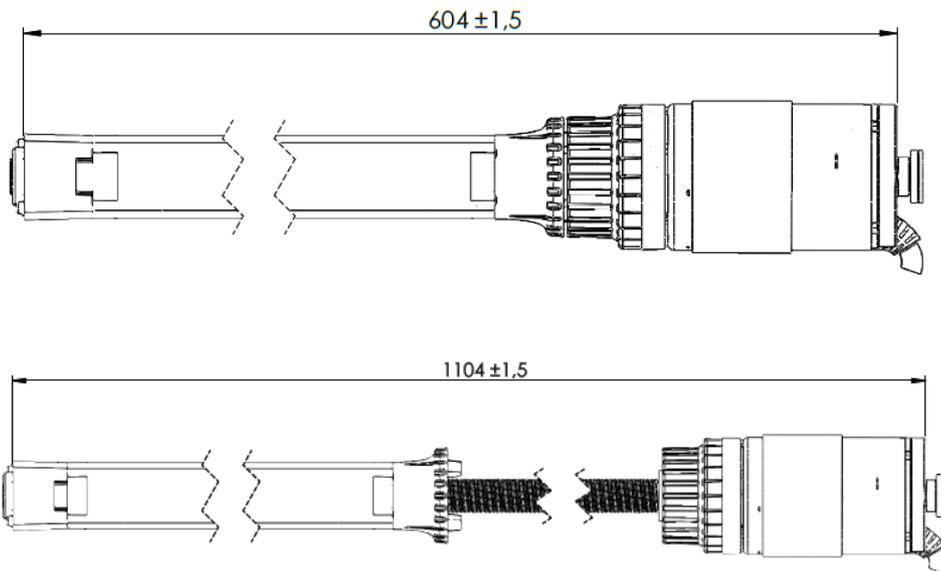
Anhangverzeichnis

Anhang 1: Baulängenvergleich der Antriebe

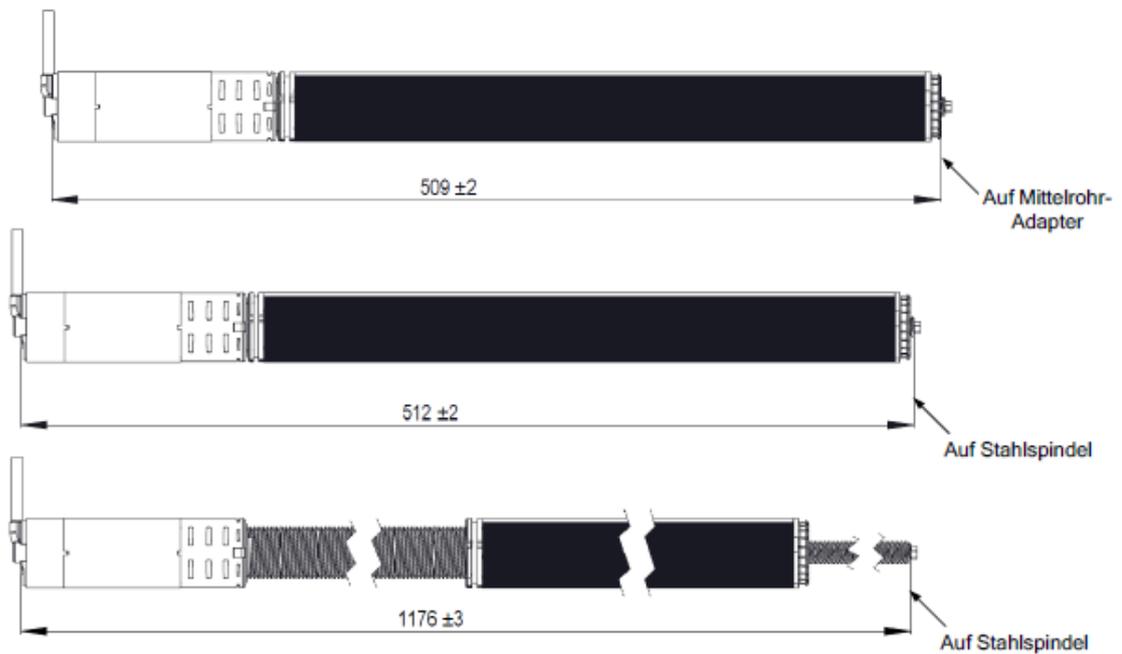
a) SLIMdrive-500

b) SLIMdrive-660s

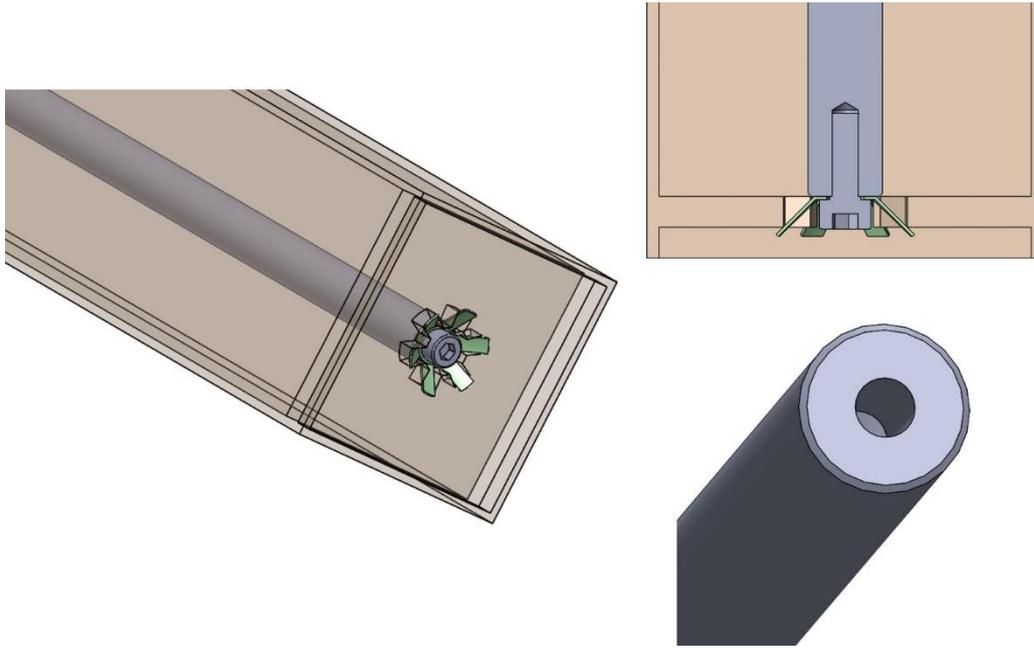
a)



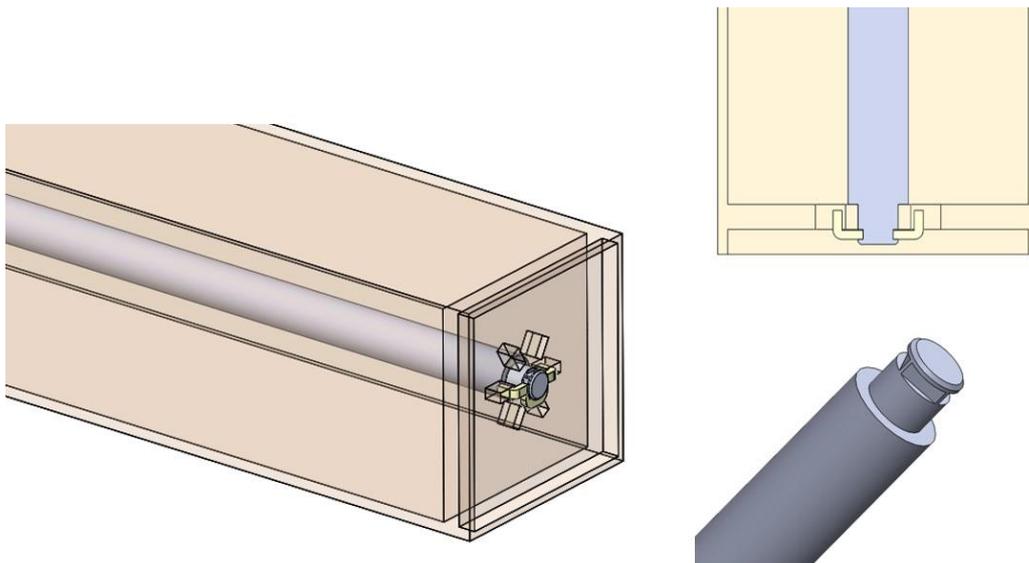
b)



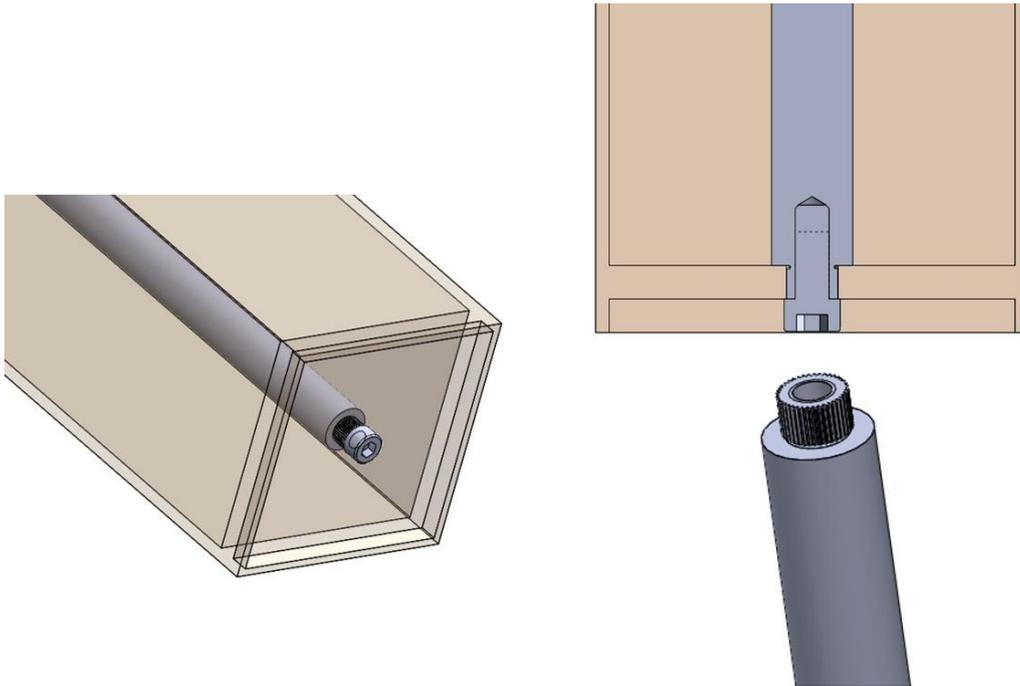
Anhang 2: Stahlspindelkonzept Sternring



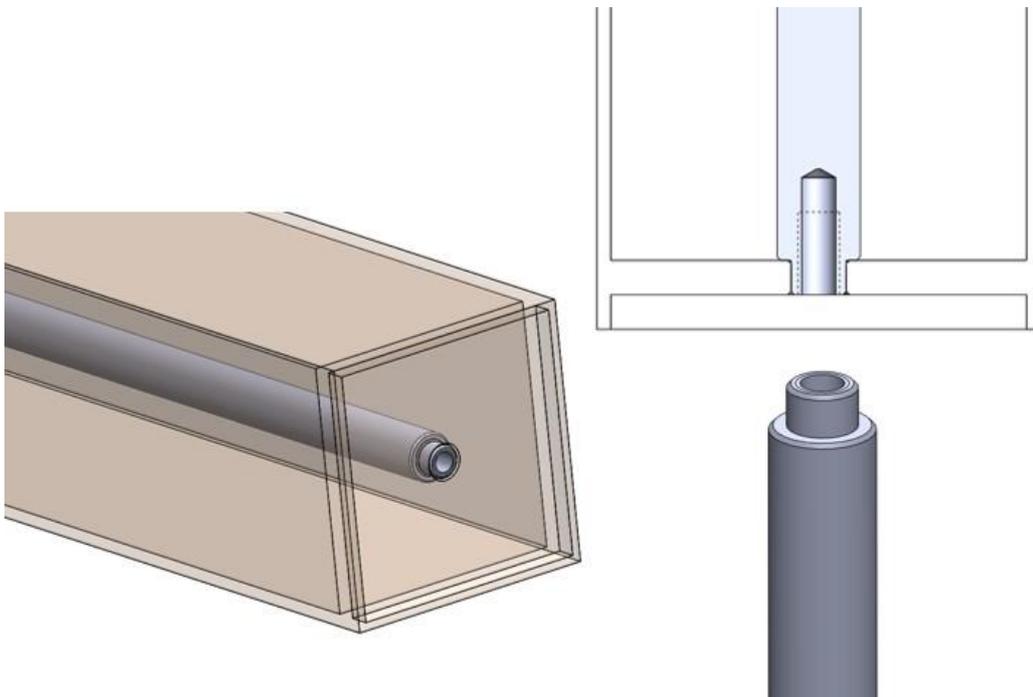
Anhang 3: Stahlspindelkonzept Sicherungsring



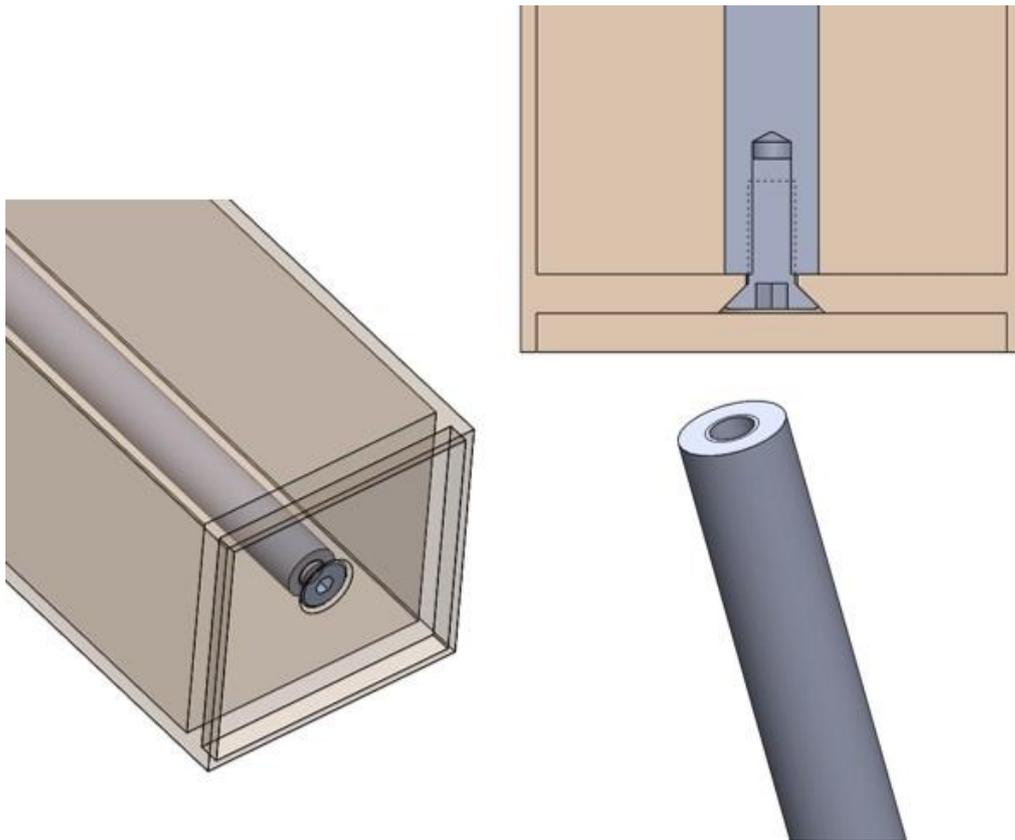
Anhang 4: Stahlspindelkonzept Kerbverzahnung



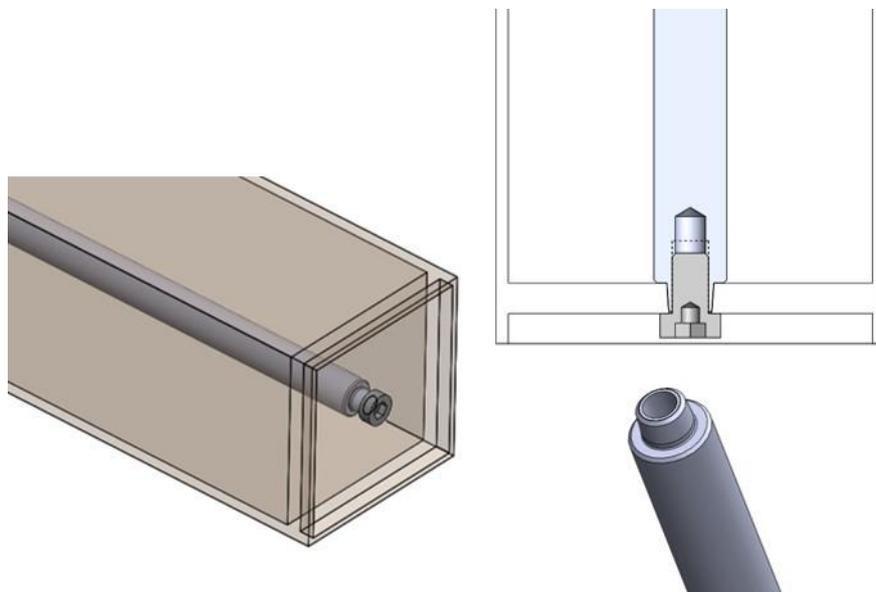
Anhang 5: Stahlspindelkonzept Pressverband



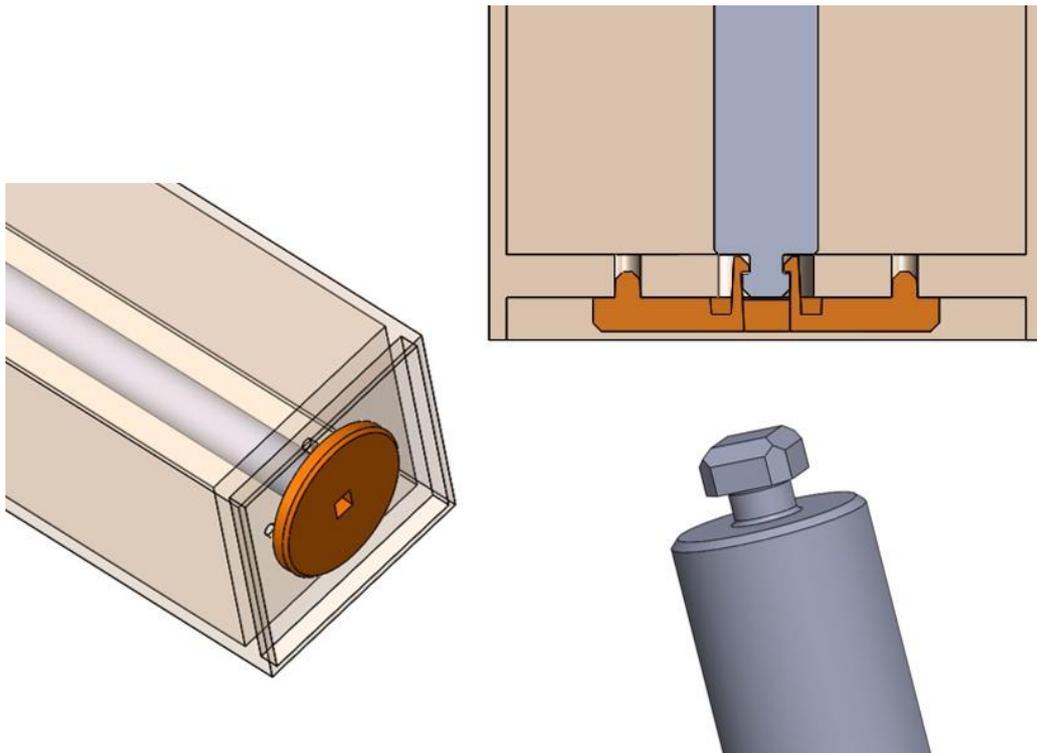
Anhang 6: Stahlspindelkonzept Reibschlussverbindung



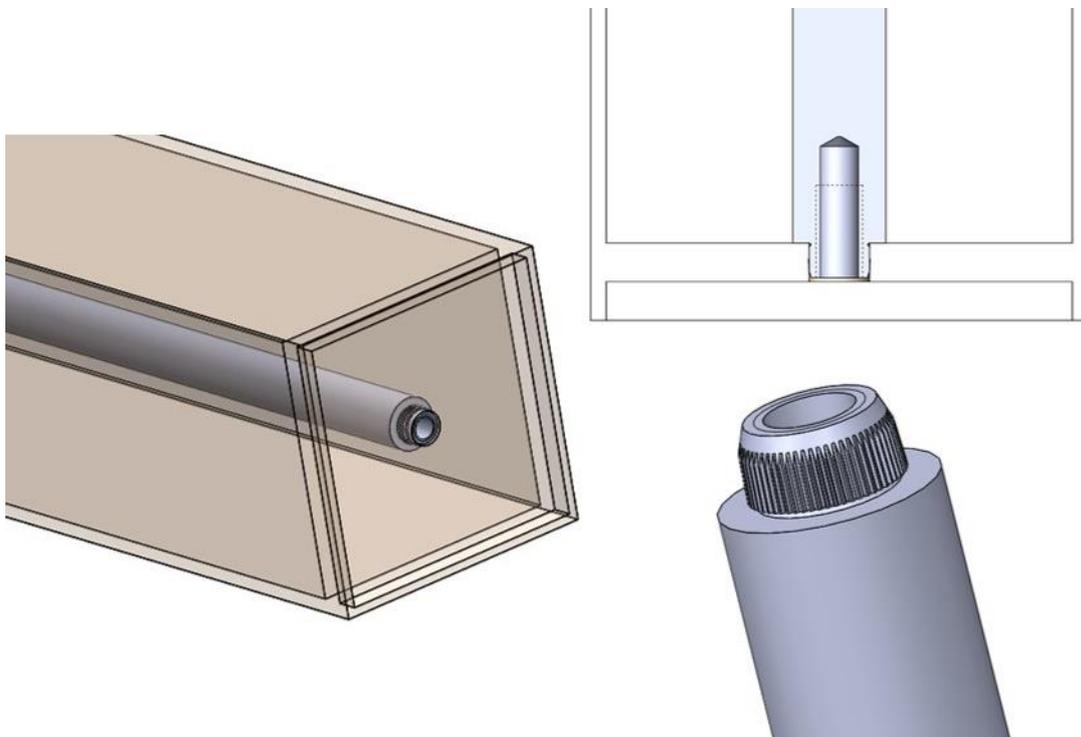
Anhang 7: Stahlspindelkonzept Reibkonus mit Innengewinde



Anhang 8: Stahlspindelkonzept Befestigungsclip



Anhang 9: Stahlspindelkonzept Rändelreibklemmung



Anhang 10: Paarweiser Vergleich Auswertung gesamt

Paarweiser Vergleich Gesamt

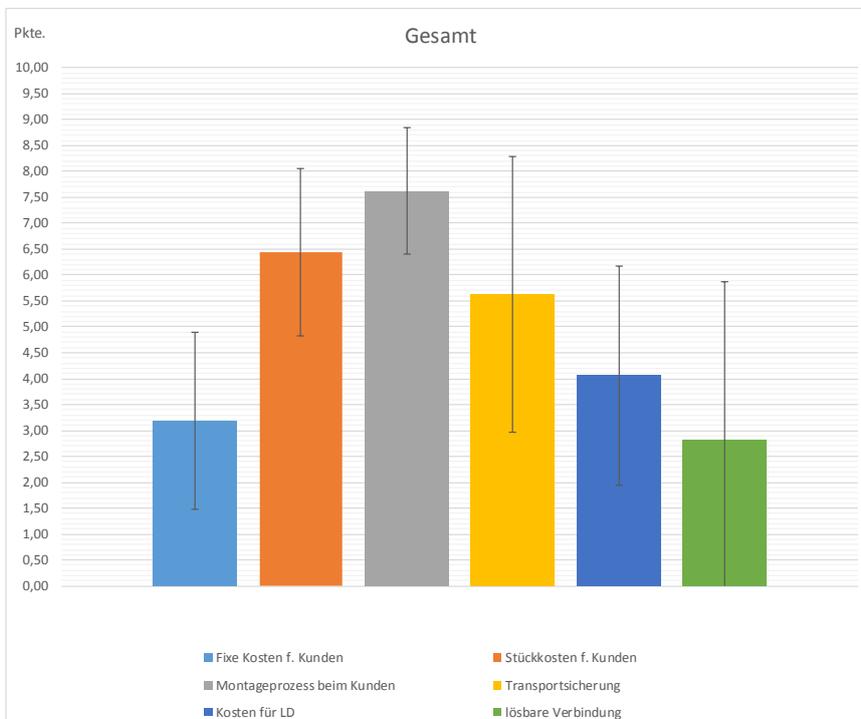
gegenüber bewerten	Fixe Kosten f. Kunden	Stückkosten f. Kunden	Montageprozess beim Kunden	Transportsicherung	Kosten für LD	lösbare Verbindung	Mittelwert	%	Rangfolge
							Gesamt		
Investitionskosten, Maschinen, Änderungskosten	Fixe Kosten f. Kunden						3,29	13,5	4
Bauteilkosten, Assemblingkosten	Stückkosten f. Kunden						6,61	27,0	2
Einfachheit, Positionsfindung	Montageprozess beim Kunden						7,44	30,4	1
	Transportsicherung								
Herstellkosten, Assemblingkosten, Bauteilkosten	Kosten für LD						4,31	17,6	3
lösen ohne den Antrieb selbst zu beschädigen	lösbare Verbindung						2,81	11,5	5
							Σ	100	

Erläuterung: 2 wichtiger horizontal wichtiger als vertikal
 1 gleich wichtig horizontal gleich vertikal
 0 weniger wichtig horizontal weniger wichtig als vertikal

Definition KO-Kriterien: Drop&Drive

Gesamtheit

Mittelwert	3,19	6,44	7,63	5,63	4,06	2,81
Varianz	2,90	2,62	1,48	7,11	4,43	9,40
Standardabweichung	1,70	1,62	1,22	2,67	2,11	3,07



Anhangverzeichnis

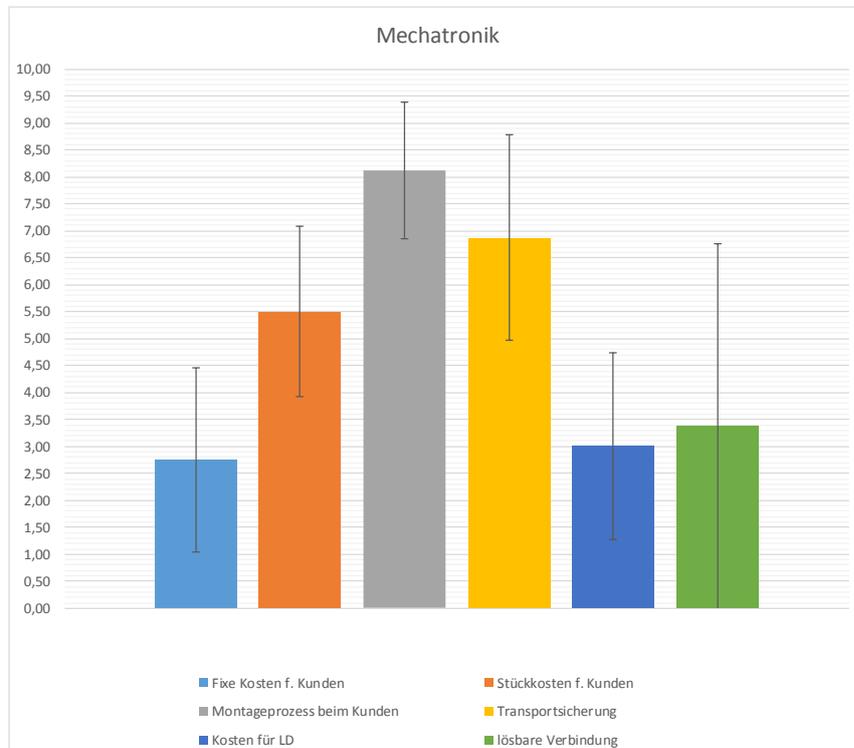
Anhang 11: Paarweiser Vergleich Auswertung Mechatronik

Paarweiser Vergleich ME

gegenüber bewerten	Fixe Kosten f. Kunden	Stückkosten f. Kunden	Montageprozess beim Kunden	Transportsicherung	Kosten für LD	lösbare Verbindung	Mittelwert	%	Rangfolge
Fixe Kosten f. Kunden	ME						2,75	9,3	6
Stückkosten f. Kunden							5,50	18,6	3
Montageprozess beim Kunden							8,13	27,4	1
Transportsicherung							6,88	23,2	2
Kosten für LD							3,00	10,1	5
lösbare Verbindung							3,38	11,4	4
							Σ	100	

Mechatronik

Anzahl Befragter	1	2	3	4	5	6	7	8
1	4	7	7	10	2	0		
2	4	7	9	5	2	3		
3	5	3	9	6	0	7		
4	3	5	7	9	6	0		
5	3	7	8	6	3	3		
6	3	4	10	8	5	0		
7	0	7	9	4	3	4		
8	0	4	6	7	3	10		
Mittelwert	2,75	5,50	8,13	6,88	3,00	3,38		
Varianz	2,94	2,50	1,61	3,61	3,00	11,48		
Standardabweichung	1,71	1,58	1,27	1,90	1,73	3,39		



Anhangverzeichnis

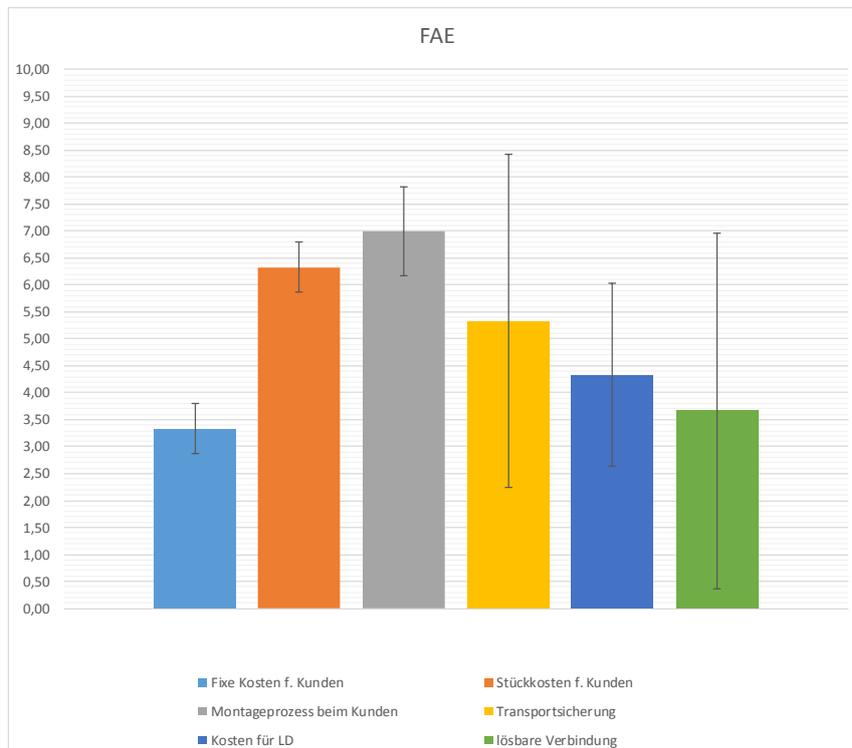
Anhang 12: Paarweiser Vergleich Auswertung Field Application

Paarweiser Vergleich FAE

gegenüber bewerten	Fixe Kosten f. Kunden	Stückkosten f. Kunden	Montageprozess beim Kunden	Transportsicherung	Kosten für LD	lösbare Verbindung	Mittelwert	%	Rangfolge
Fixe Kosten f. Kunden	FAE						3,33	11,1	6
Stückkosten f. Kunden							6,33	21,1	2
Montageprozess beim Kunden							7,00	23,3	1
Transportsicherung							5,33	17,8	3
Kosten für LD							4,33	14,4	4
lösbare Verbindung							3,67	12,2	5
							Σ	100	

FAE

Anzahl Befragter	1	2	3	4	5	6	7	8
1	3	6	8	8	2	3		
2	3	6	7	1	5	8		
3	4	7	6	7	6	0		
Mittelwert	3,33	6,33	7,00	5,33	4,33	3,67		
Varianz	0,22	0,22	0,67	9,56	2,89	10,89		
Standardabweichung	0,47	0,47	0,82	3,09	1,70	3,30		



Anhangverzeichnis

Anhang 13: Paarweiser Vergleich Auswertung Sales und Product Line Management

Paarweiser Vergleich Sales&PLM

gegenüber bewerten	Fixe Kosten f. Kunden	Stückkosten f. Kunden	Montageprozess beim Kunden	Transportsicherung	Kosten für LD	lösbare Verbindung	Mittelwert	%	Rangfolge
Fixe Kosten f. Kunden	Sales+PLM						3,80	12,8	4
Stückkosten f. Kunden							8,00	26,8	1
Montageprozess beim Kunden							7,20	24,2	2
Transportsicherung							3,80	12,8	4
Kosten für LD							5,60	18,8	3
lösbare Verbindung							1,40	4,7	6
							Σ	100	

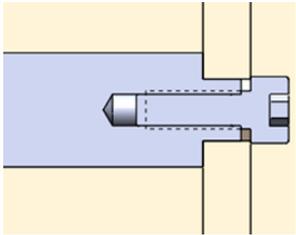
Sales & PLM

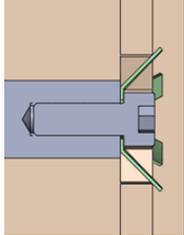
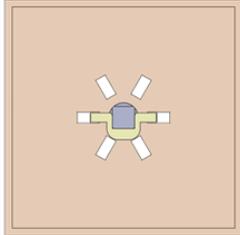
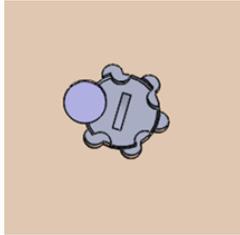
Anzahl Befragter	1	2	3	4	5	6	7	8
1		2	9	8	5	4	1	
2		6	8	6	7	3	0	
3		5	7	8	4	6	0	
4		5	8	8	0	7	2	
5		1	8	6	3	8	4	
Mittelwert		3,80	8,00	7,20	3,80	5,60	1,40	
Varianz		4,70	0,50	1,20	6,70	4,30	2,80	
Standardabweichung		2,17	0,71	1,10	2,59	2,07	1,67	



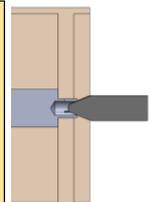
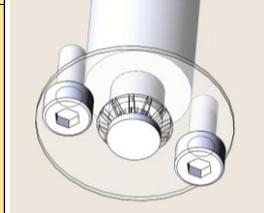
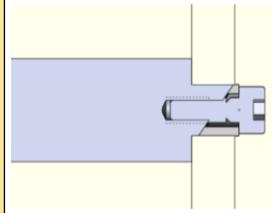
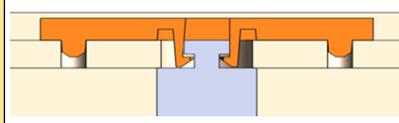
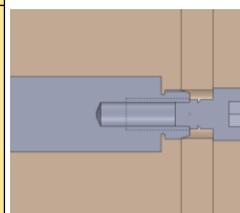
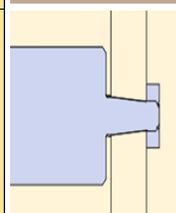
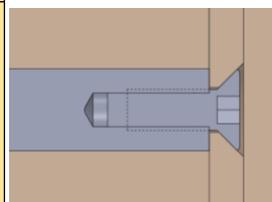
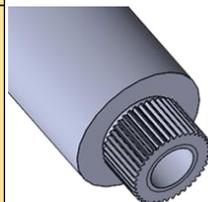
Anhang 14: Nutzwertanalyse Konzepte Stahlspindel

Kriterien	Gewichtung	Stand der Technik LOGICDATA Sechskant		Stand der Technik Vielzahn Linak		Stand der Technik Kegelverbindung Okin		Konzept 1 Sternring		Konzept 4 Sicherungsring		Konzept 5 Selbstschneideschrauben	
		Punkte	gew.	Punkte	gew.	Punkte	gew.	Punkte	gew.	Punkte	gew.	Punkte	gew.
Fixe Kosten f. Kunden	14%	10	1,4	6	0,8	2	0,3	9	1,2	7	0,9	9	1,2
Stückkosten f. Kunden	27%	9	2,4	2	0,5	2	0,5	8	2,2	7	1,9	8	2,2
Montageprozess beim Kunden	30%	1	0,3	8	2,4	9	2,7	8	2,4	5	1,5	5	1,5
Transportsicherung			0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0
Kosten für LD	18%	8	1,4	8	1,4	9	1,6	7	1,2	7	1,2	8	1,4
lösbare Verbindung	12%	10	1,2	10	1,2	10	1,2	10	1,2	7	0,8	7	0,8
Σ	100%		6,6		6,3		6,3		8,2		6,4		7,1
Rang		8		10		11		4		9		7	



Konzept 6 Kerbverzahnung		Konzept 8 Reibschlussverbindung		Konzept 9 Reibkonus		Konzept 13 Rändelkonus		Konzept 15 Befestigungsclip		Konzept 16 Reibklemmung		Konzept 17 Starlockprinzip		Konzept 18 Verprägung	
Punkte	gew.	Punkte	gew.	Punkte	gew.	Punkte	gew.	Punkte	gew.	Punkte	gew.	Punkte	gew.	Punkte	gew.
8	1,1	8	1,1	9	1,2	9	1,2	9	1,2	9	1,2	7	0,9	6	0,8
6	1,6	8	2,2	9	2,4	9	2,4	6	1,6	10	2,7	6	1,6	8	2,2
2	0,6	9	2,7	9	2,7	9	2,7	7	2,1	10	3,0	8	2,4	9	2,7
	0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0		0,0
4	0,7	10	1,8	9	1,6	8	1,4	2	0,4	6	1,1	3	0,5	10	1,8
10	1,2	10	1,2	9	1,0	2	0,2	7	0,8	10	1,2	4	0,5	2	0,2
	5,2		8,9		9,0		8,0		6,1		9,2		6,0		7,7
14		3		2		5		12		1		13		6	



Anhangverzeichnis

Anhang 15: Auszug aus Design-FMEA

DESIGN FMEA		FEHLER-MÖGLICHKEITS- UND EINFLUSS-ANALYSE				Erstellt: ARU		FMEA Datum: 16.01.2017		FMEA Team: RRO, PHGO, HAPU, ANDO, LLA, ARU	
Element / Funktion	Mögliche Fehlerfolgen	Bedeutung	Möglicher Fehler / Fehlfunktion	Mögliche Fehlerursachen	Derzeitiger Zustand				Empfohlene Abstellmaßnahmen		
					Vermeidungsmaßnahmen	Auftreten	Entdeckungsmaßnahmen	Entdeckung RPZ Risikoprioritätszahl			
1. Konzept 5 Selbstschneideschraube (Ejot)											
Funktion											
1 Stahlspindelanbindung											
Axialkraftübertragung	System (Tisch, Antrieb) defekt	8	keine Druckkraftübertragung	zu hohe Flächenpressung	Materialauswahl Spindel->LD Flächenpressung berechnen -> für Kunden (Aufnahme der Daten ins Usermanual)	2	Dauerlauf	4	64		
					Toleranzrechnung für genügend Überdeckung (Inventory Simulation) -> Toleranzkette	2	Dauerlauf	10	160		
			keine Zugkraftübertragung	Schraubenverbindung (Spindel, Schraube, Platte) geht kaputt	Schraubendimensionierung (Material, Bauteilgeometrien)	Dauerlauf	4	320			
						Max load Test	2	160			
						Pulltest; Resettest	4	320			
						Dauerlauf	6	480	Schraubensicherung verwenden		
falsches Anzugsmoment vom Kunden	Design In Phase mit Kunden starten	definiertes Anzugsmoment im Manual für Kunden	Tests in Abstimmung mit dem Kunden	4	256						
			Tests in Abstimmung mit dem Kunden	4	192						
Momentenübertragung	System (Tisch, Antrieb) defekt	8	keine Momentenübertragung	Schraubenverbindung (Spindel, Schraube, Platte) geht kaputt	Schraubendimensionierung (Material, Bauteilgeometrien)	Dauerlauf	4	320			
						Max load Test	2	160			
						Pulltest; Resettest	4	320			
						Dauerlauf	6	480	Schraubensicherung verwenden		
						Reset	6	480	Schraubensicherung verwenden		
						falsches Anzugsmoment vom Kunden	Design In Phase mit Kunden starten	definiertes Anzugsmoment im Manual für Kunden	Tests in Abstimmung mit dem Kunden	4	256
Tests in Abstimmung mit dem Kunden	4	192									
Spieffreiheit	Geräusch	4	Spiel im System	Schraubenverbindung (Spindel, Schraube, Platte) geht kaputt	Schraubendimensionierung (Material, Bauteilgeometrien)	Dauerlauf	4	160			
						Max load Test	2	80			
						Pulltest; Resettest	4	160			
						Dauerlauf	6	240			
						Reset	6	240			
						falsches Anzugsmoment vom Kunden	Design In Phase mit Kunden starten	definiertes Anzugsmoment im Manual für Kunden	Tests in Abstimmung mit dem Kunden	4	128
Tests in Abstimmung mit dem Kunden	4	96									
Assemblierung in die Säule	kein Einbau	10	nicht ffügbar	Toleranzpaarung falsch	Toleranzkettenrechnung	2	Test (Assembly, Montage DVP)	6	120		
	schwerer Einbau	8	schwer ffügbar	Toleranzpaarung (Form-und Lagetoleranzen) falsch	Toleranzkettenrechnung	4	Test (Assembly, Montage DVP)	6	192		
				Antriebsseinflüsse (Spindelmutter->Spindel) lässt sich nicht drehen	Toleranzkettenrechnung	10	Test (Assembly, Montage DVP)	10	800	Test mit schwergängigem Kavitätenmix vom Antrieb an Gewindeinsatz und Stahlspindel sowie worst case Toleranzpaarung	
1.1 Spindel											
Axialkraftübertragung	System (Tisch, Antrieb) defekt	8	keine Druckkraftübertragung	zu hohe Flächenpressung	Materialauswahl mittels Berechnung	2	Einzeltest auf max. Load	2	32		
Momentenübertragung	System (Tisch, Antrieb) defekt	8	keine Momentenübertragung	zu hohe Flächenpressung	Materialauswahl mittels Berechnung	2	Einzeltest auf max. Load	2	32		
1.2 Säule											
Axialkraftübertragung	System (Tisch, Antrieb) defekt	8	keine Druckkraftübertragung	zu hohe Flächenpressung	Materialauswahl mittels Berechnung	2	Einzeltest auf max. Load	2	32		
			keine Zugkraftübertragung	zu hohe Scherkräfte	Materialauswahl mittels Berechnung	2	Einzeltest auf max. Load	2	32		
Momentenübertragung	System (Tisch, Antrieb) defekt	8	keine Momentenübertragung	zu hohe Flächenpressung	Materialauswahl mittels Berechnung	2	Einzeltest auf max. Load	2	32		
1.3 Schraube											
Axialkraftübertragung	System (Tisch, Antrieb) defekt	8	keine Zugkraftübertragung	zu grobe Toleranzen	Toleranzberechnung neu	2	Einzeltest auf max. Load	2	32		
				zu hohe Scherbeanspruchung	Schraubendimensionierung neu	2	Einzeltest auf max. Load	2	32		
Momentenübertragung	System (Tisch, Antrieb) defekt	8	keine Momentenübertragung	zu hohe Scherbeanspruchung	Schraubendimensionierung neu	2	Einzeltest auf max. Load	2	32		

Anhang 16: 1. Auszugversuch Stahlspindelprototyp Konzept 16 30°

