



Mair Simon David, BSc

**Entwicklung einer universellen Vakuum-Spannvorrichtung zur
Nachbearbeitung von Faserverbundbauteilen für die Luftfahrt-
industrie**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Dipl.-Ing. Georg Mörwald

Institut für Fertigungstechnik

Graz, März 2016

In Kooperation mit:

MICADO SMART ENGINEERING 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 entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

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 indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

.....

date

.....

(signature)

Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung einer universellen Vakuum-Spannvorrichtung zur Nachbearbeitung von Faserverbundbauteilen für die Luftfahrtindustrie innerhalb einer Fräsmaschine.

Die Firma MICADO hat langjährige Erfahrung im Bereich der Vakuum-Spannvorrichtungen, mit dem Bestreben, die Herstellungsprozesse in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht ständig zu verbessern. Dies bedeutet vor allem Rüstzeiten zu minimieren, sowie ein möglichst großes Bauteilspektrum abdecken zu können. Die geforderte Flexibilität wird mit sogenannten universellen Spannvorrichtungen erreicht.

Ziel dieser Masterarbeit ist es, einen Prototypen einer einstellbaren Säule, dem Schlüsselement einer solchen universellen Spannvorrichtung zu entwickeln. Mithilfe von Recherche-Tools wird nach möglichen Lösungsansätzen gesucht, die in die Konzeptentwicklung eingearbeitet werden. Zur Ermittlung des aussichtsreichsten Konzeptes werden Bewertungsmethoden eingesetzt, die den Entscheidungsprozess unterstützen. Anschließend erfolgt die konstruktive Umsetzung und Inbetriebnahme des Prototypen. Anhand festgelegter Kriterien wird der Prototyp Tests unterzogen, an denen der Erfolg des Projektes gemessen wird.

Die Ergebnisse werden mit der Firma MICADO besprochen und sollen das Knowhow des Unternehmens im Spannvorrichtungssektor erweitern.

Abstract

The purpose of this thesis is the development of a universal vacuum clamping device within a milling machine for the post-processing of fiber composite components in the aerospace industry.

The MICADO Company has many years of experience in the vacuum clamping device sector with the effort to improve the manufacturing process regarding technical and economic terms. This indicates especially short set-up times and covering the widest possible range of components. These universal clamping devices achieve the required high level of flexibility. The aim of this master thesis is the development of a prototype of an adjustable pillar, the key element of such a universal clamping device. Using investigation tools, it will be searched for possible solutions to be integrated in the development process. To determine the most promising concept, valuation methods are used to support the decision making process. This is followed by the constructive implementation and start-up of the prototype. Based on specified criteria, the prototype will be tested to measure the project's success. The results are discussed with the MICADO Company and are now hoped to extend the expertise of the company's clamping device sector.

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all denen bedanken, die mich bei der Anfertigung meiner Masterarbeit so kräftig unterstützt haben.

Allen voran bei der Firma MICADO, die mir die Chance gegeben hat, mich mit einem praxisnahen Thema auseinanderzusetzen. Meine Ansprechpersonen Herr Ing. Edwin Meindl und Herr Mag. Christian Falch konnten mit ihrer langjährigen Erfahrung stets konstruktiven Input beisteuern.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Ansprechpersonen am Institut für Fertigungstechnik Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Franz Haas, Herrn Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Jörg Edler und Frau Dipl.-Ing. Manuela Redecker bedanken. Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Georg Mörwald für seine hilfreichen Anregungen und seiner lehrreichen Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit.

Meine Eltern, Freundin und Freunde haben mich während meiner gesamten Ausbildung stets unterstützt, wofür ich ihnen sehr dankbar bin.

Graz, im März 2016

Simon Mair

Abkürzungsverzeichnis

etc.	et cetera
EUR	Euro
NPSS	Nullpunktspannsystem

Lateinische Buchstaben

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
M	Moment	Nmm
F_{Merf}	Erforderliche Magnethaltekraft	N
F_Q	Querkraft	N
L	Säulenlänge	mm
B	Säulenbreite	mm

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Aufgabenstellung und Zielsetzung	3
3	Stand der Technik	5
3.1	Begriffserklärung	5
3.2	Flexible Vorrichtungssysteme.....	5
4	Konzeptfindung	8
4.1	Patentrecherche.....	8
4.1.1	Vorgehensweise.....	8
4.1.2	Ergebnisse	10
4.2	Produktrecherche.....	12
4.2.1	Verbindung Säule zu Auflagefläche.....	12
4.2.2	Energieversorgung in Säule	15
4.2.3	Kommunikation	17
4.3	Konzeptentwicklung	18
4.3.1	Konzept - passive Teleskopsäule	23
4.3.2	Konzept - Bausteinsystem.....	27
4.3.3	Zusammenfassung.....	29
4.4	Konzeptabsicherung.....	30
4.4.1	Magnetspannelement - Haltekraft.....	30
4.4.2	Vakuumventile - Schaltbereich Magnetventile	36
5	Konstruktion	38
6	Messungen	43
6.1	Messkomponenten.....	43
6.2	Führungsspielauswirkungen auf Vakuumkopf	44
6.2.1	Vorgehensweise.....	44
6.2.2	Messergebnisse	44
6.3	Axialspiel Klemmelement	45
6.3.1	Vorgehensweise.....	45
6.3.2	Messergebnisse	46
6.4	Positionsabweichung durch Querkraftbelastung.....	47
6.4.1	Vorgehensweise.....	47
6.4.2	Messergebnisse	48

6.5	XY-Genauigkeit von Kopfposition	48
6.5.1	Vorgehensweise.....	48
6.5.2	Messergebnisse	49
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	51
	Literaturverzeichnis	53
	Abbildungsverzeichnis	55
	Tabellenverzeichnis	57

1 Einleitung

Die Firma MICADO ist ein spezialisierter Anbieter von innovativen Fertigungsmitteln für die Herstellung von Faserverbundbauteilen. Besonders im Bereich der Luftfahrtindustrie beschäftigt sich das Unternehmen intensiv mit der Entwicklung von Spannvorrichtungen zum Aufspannen von ausgehärteten Faserverbund-Strukturen während des Nachbearbeitungsprozesses in Fräsmaschinen.

Der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen im Luftfahrtsektor führt technologiebedingt zu höheren Material- und Prozesskosten. Ein großer Bestandteil der Produktionsprozesskosten stellt die manuelle und maschinelle Nachbearbeitung der Bauteile dar. Diese können trotz moderner Produktionsprozesse nicht werkzeugfallend ausgeführt werden. Das bedeutet, dass der sogenannte Überstand, der ein Resultat des Fertigungsprozesses ist, nach dem Aushärten entfernt bzw. die Bauteilkontur durch Befräsen hergestellt wird und Montagebohrungen eingebracht werden müssen (siehe Abbildung 1).

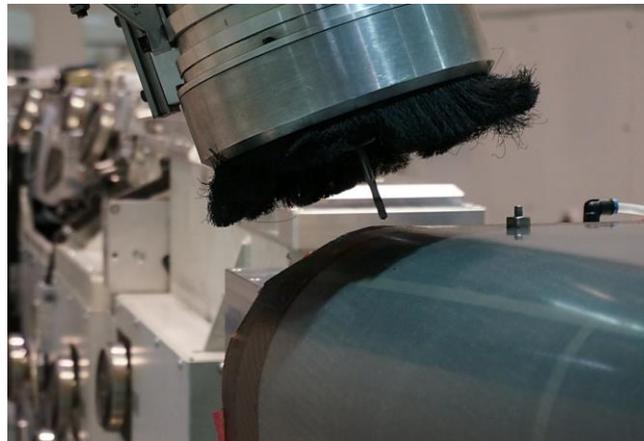


Abbildung 1: Befräsen des Überstands von CFK-Bauteil,
Quelle: Micado (2016), Onlinequelle [02.02.2016].

Es gilt daher neue Lösungskonzepte zu entwickeln, die den Produktionsprozess wirtschaftlicher gestalten. Dabei steht Effizienzsteigerung und Prozessoptimierung an vorderster Stelle, damit die geforderten Kosteneinsparungen erzielt werden können.

Hohes Potential besteht in der Reduktion der Vorrichtungskosten. Zum größten Teil werden derzeit so genannte Hard Tools für die Nachbearbeitung von Faserverbundbauteilen in der Automobil- und Luftfahrtindustrie eingesetzt. Darunter versteht man konventionelle, starre Vorrichtungen, die das Negativ der zu spannenden Geometrie abbilden und das Bauteil mithilfe von reduziertem Druck (Vakuum) halten (siehe Abbildung 2). Der große Vorteil dieser Vorrichtungen liegt in der hohen Spannkraft, der großen Vakuumspannfläche und der vollflächigen Auflage des Bauteils, die Deformationen und Vibrationen während der Bearbeitung weitestgehend verhindern. Der große Nachteil liegt, wie bereits zuvor beschrieben, in der hohen Anzahl an Spannvorrichtungen, da je Bauteil eine eigene Spannvorrichtung benötigt wird. Daher sind diese Spannvorrichtungen äußerst kostenintensiv und sehr unflexibel bei Änderungen der Bauteilgeometrie.

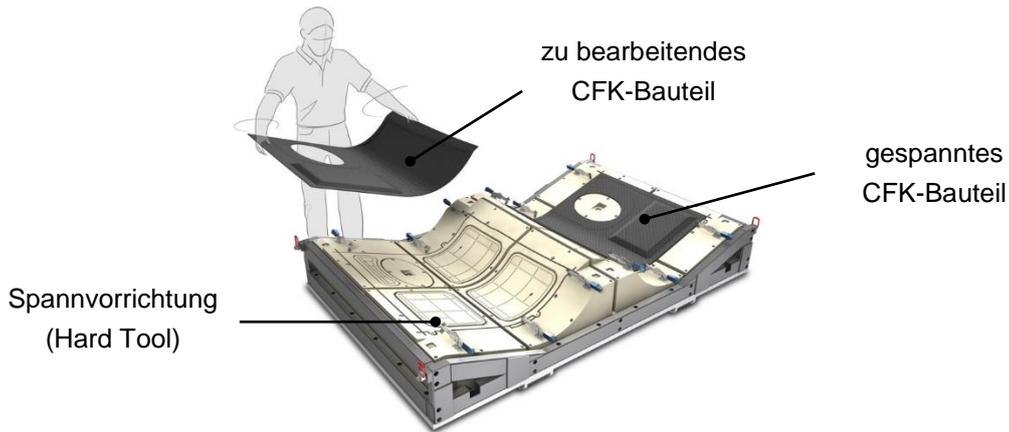


Abbildung 2: Konventionelle Vakuumspannvorrichtung / Hard Tool,
Quelle: Micado (2016), Onlinequelle [02.02.2016].

Bei hohen Stückzahlen und Bauteilfamilien werden hauptsächlich universelle Vakuumspannvorrichtungen eingesetzt. Unter einer Bauteilfamilie versteht man eine Sammlung von Bauteilen, die sich in Form und Größe ähneln, aber trotzdem unterschiedlich sind. Abbildung 3 zeigt die Umsetzung einer universellen Vakuumspannvorrichtung von MICADO für solch eine Bauteilfamilie. Je nach zu bearbeitenden Bauteil bestückt ein Portalroboter vollautomatisch die Stützsäulen, inklusive der an die Bauteilgeometrie angepassten Vakuumplatten aus einem Magazin. Die Säulen werden mittels Nullpunktspannsystem mit dem Unterbau verbunden und leiten das Vakuum an die Platten weiter. Der Unterbau ist modular aufgebaut und kann in der Länge beliebig erweitert werden. Durch den hohen Automatisierungsgrad werden die Rüstzeiten um bis zu 60 Prozent reduziert. Zusätzlich wird der Lagerplatzbedarf reduziert, da bei ähnlichen Bauteilen nur die Vakuumplatten ausgetauscht werden müssen.

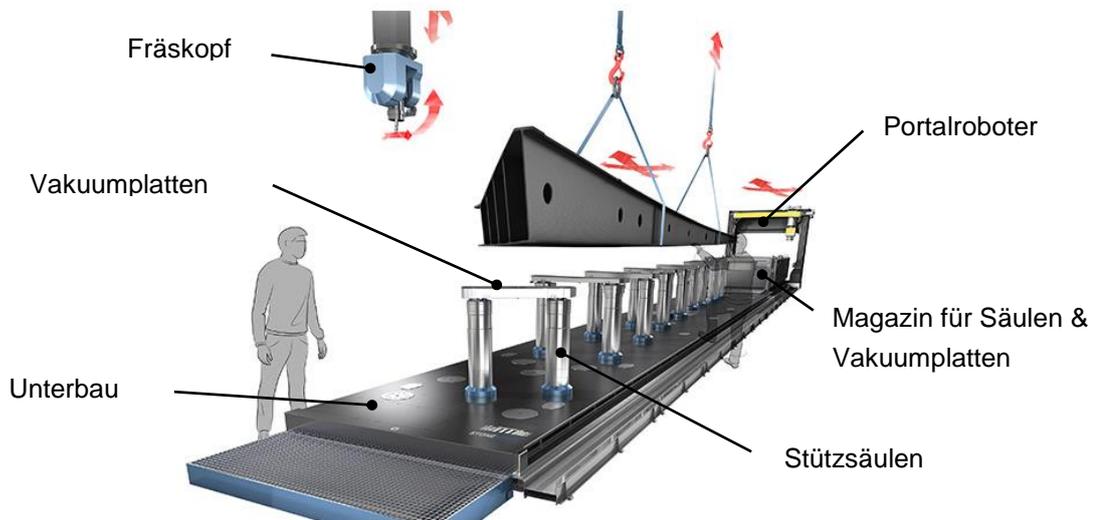


Abbildung 3: universelle Vakuumspannvorrichtung,
Quelle: Micado (2016), Onlinequelle [02.02.2016].

Der Einsatz von universellen Vakuumspannvorrichtungen zeigt, wie mit Kombination von Automatisierung und Flexibilität die Prozesskosten gesenkt werden können. Auf diesen Erkenntnissen basierend gilt es neue Lösungsvorschläge zu konzipieren, die die Prozessoptimierung vorantreiben.

2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Diese Arbeit hat die Entwicklung einer universellen Spannvorrichtung zur Nachbearbeitung von Faserverbundbauteilen für die Luftfahrtindustrie innerhalb einer Fräsmaschine zum Ziel. Es soll ein Prototyp einer einstellbaren Säule, dem Schlüsselement einer solchen universellen Spannvorrichtung, entwickelt werden. Das dem Prototypen zugrundeliegende, aussichtsreichste Konzept der einstellbaren Säule soll unter Berücksichtigung technischer, sowie wirtschaftlicher Aspekte, evaluiert werden. Anhand dieser Erkenntnisse soll ein voll funktionsfähiger Prototyp entwickelt, hergestellt, erprobt und weiterentwickelt werden.

Durch diese vorgezogene Entwicklung kann eruiert werden, welche Probleme bei der Entwicklung einer gesamten Vorrichtung auftreten können. Durch die schrittweise Herangehensweise soll das Risiko des Projektes minimiert und der technisch und wirtschaftlich verwertbare Output maximiert werden.

Die Hauptaufgabe der Säulen besteht darin, die während der Fräsbearbeitungen auftretenden Bearbeitungskräfte aufzunehmen, sowie die Bauteile zu unterstützen. Des Weiteren werden erforderliche Ziele festgelegt, die als Grundvoraussetzung während des gesamten Entwicklungsprozesses dienen sollen, wobei bei einer Nichterfüllung nach alternativen Lösungswegen gesucht werden muss. Diese Festlegungen lauten wie folgt:

- Freie Positionierbarkeit jeder Säule auf dem Untergrund, d.h. nicht rastergebunden;
- Vakuum muss als Spanntechnologie am Säulenkopf vorhanden sein;
- Geometrie der Spannvorrichtung bleibt auch ohne Energiezufuhr (Strom, Vakuum) erhalten, d.h. „selbsthemmendes System“;
- Energieversorgung von Säulen ohne fix verbundene Kabel oder Schläuche;
- Kommunikation der Säulen mit externer Steuerung;
- Automatisierbarkeit des Systems.

Die technische Umsetzbarkeit, sowie die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Lösungsansätze werden anhand fixierter Rahmenbedingungen evaluiert. Die dabei definierten Werte ergeben sich aus jahrelanger Erfahrung des Unternehmens im Spannvorrichtungssektor, sowie aus Kundenvorgaben:

- Produktionskosten pro Säule um die €3000,- ;
- Höhenverstellung (Hub) maximal 500mm;
- Abstand von Säule zu Säule soll 300mm betragen können;
- Maschinelle Positionierbarkeit und Lösbarkeit jeder Säule (z.B. Industrieroboter);
- Hohe Steifigkeit bei Querkraftbelastungen von 500N: zulässige Verformung im ausgefahrenen Zustand +/- 0,2mm;
- Kraftaufnahme in axialer Richtung von mindestens 1000N;
- Allgemeine Genauigkeit: +/- 0,15mm;
- Schmutz- und Staubanfälligkeit in Arbeitsumgebung beachten - IP65;
- Skalierbarkeit für kleine und große Bauteile;
- Rüstzeit der Spannvorrichtung.

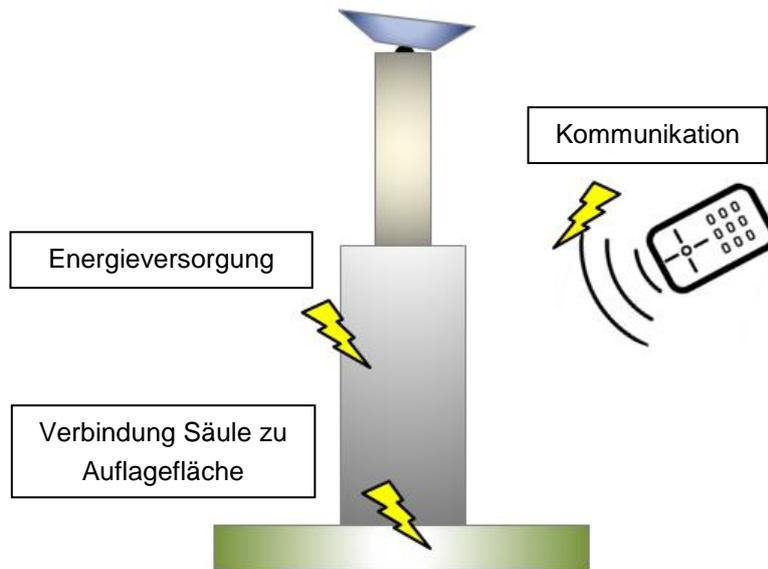


Abbildung 4: Kernaufgabengebiete der Entwicklung,
Quelle: Eigene Darstellung.

Aus den gesteckten Zielen und Rahmenbedingungen ergeben sich für den Entwicklungsprozess somit drei grundlegende Kernaufgabengebiete, die es zu lösen gilt (siehe Abbildung 4):

- Verbindung Säule zu Auflagefläche;
- Energieversorgung der Säule;
- Kommunikation zwischen Steuereinheit und Säule.

3 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Begriffe im Vorrichtungsbaubau erläutert und ein Einblick in den Themenbereich der flexiblen Vorrichtungssysteme in der Luftfahrtindustrie gegeben.

3.1 Begriffserklärung

Unter einer Vorrichtung versteht man nach DIN 6300 Fertigungsmittel, die an Werkstücke gebunden sind und unmittelbar in Beziehung zum Arbeitsvorgang stehen. Sie dienen dazu, Werkstücke zu positionieren, zu halten oder zu spannen und gegebenenfalls ein oder mehrere Werkzeuge zu führen.

Je nach Werkstück unterscheidet man zwischen Standardvorrichtungen und Sondervorrichtungen. Standardvorrichtungen, wie Schraubstöcke oder Spanndorne, werden zum Spannen von geometrisch ähnlichen Werkstücken eingesetzt. Sonderspannvorrichtungen hingegen sind für ein bestimmtes Werkstück ausgelegt und werden wesentlich in der spannenden Fertigung verwendet. Dazu gehören beispielsweise Bohr-, Fräs-, oder Schleifvorrichtungen.

Die Hauptaufgaben von Spannvorrichtungen sind die definierte Lagebestimmung des Werkstücks zum Werkzeug, sowie die Beibehaltung der Lage, unter Bearbeitungsbedingungen durch Spannen des Werkstücks. Ziel ist es, die Nebenzeiten, die durch das Ausrichten, Spannen und Messen entstehen, zu verkürzen und die Flexibilität zu erhöhen. Durch optimale Anpassung der Vorrichtung an den Verwendungszweck können die Herstellungskosten gesenkt und eine wirtschaftliche Fertigung garantiert werden.¹

3.2 Flexible Vorrichtungssysteme

Für die Nachbearbeitung von großflächigen Freiformteilen werden derzeit hauptsächlich werkstückgebundene Spannvorrichtungen, auch Hard Tools genannt, eingesetzt. Darunter versteht man konventionelle, starre Vorrichtungen, die das Negativ der zu spannenden Geometrie abbilden und das Bauteil mithilfe von reduziertem Druck (Vakuum) halten. Der große Nachteil liegt in der hohen Anzahl an Spannvorrichtungen, da je Bauteil eine eigene Spannvorrichtung benötigt wird. Daher sind diese Vorrichtungen äußerst kostenintensiv und sehr unflexibel bei Änderungen der Bauteilgeometrie.

Mit Universalvorrichtungen, die sich bei Bauteiländerungen durch Neupositionierung der Stütz- und Spannelemente anpassen, kann eine Vielzahl an werkstückgebundenen Vorrichtungen ersetzt werden (siehe Abbildung 5). Dies resultiert in einer Reduktion von Rüstzeit und Lagerkosten. Die flexiblen Vorrichtungssysteme finden unter anderem Anwendung in der

¹ Vgl. Perović (2013), S. 1 ff.

Luft- und Raumfahrt, dem Automobilbereich und Schiffsbau, sowie in der Mess- und Montage-technik.²



Abbildung 5: Universelle Spannvorrichtung mit fixen Raster,
Quelle: Lorincz (2012), S. 96.

Der prinzipielle Aufbau von UHF-Vorrichtungen (Universal Holding Fixture) besteht aus einer höhenverstellbaren Kolbenstange, die in jeder Position über eine Klemmbuchse fixiert werden kann. Je nachdem wie die Kolbenstange bewegt wird, unterscheidet man zwischen aktiven und passiven Elementen.

Aktive Elemente haben einen Servo- oder Schrittmotor verbaut, der über eine Kugelumlaufspindel die Positionierung übernimmt (siehe Abbildung 5). Diese Kombination ermöglicht eine programmgesteuerte Anpassung der Säule an das Werkstück.

Passive Elemente hingegen werden hauptsächlich als Stützelemente eingesetzt, da sie keinen geregelten Antrieb besitzen. Über einen druckluftgesteuerten Pneumatikzylinder verfährt die Kolbenstange solange, bis sie an der Werkstückkontur anschlägt und geklemmt wird. Alternativ wird die Kolbenstange durch Federwirkung ausgefahren und erst durch anbringen des Werkstücks in die geforderte Position gedrückt und geklemmt. Für den Einsatz von passiven Elementen als Positionierelemente können die einzelnen Kolbenstangen durch eine Handhabungseinrichtung oder der Werkzeugmaschine selbst in die gewünschte Position gebracht werden (siehe Abbildung 6).³

² Vgl. Schwock (2010), S. 269.

³ Vgl. Schwock (2010), S. 270 ff.



Abbildung 6: Ankopplung der Werkzeugmaschinen an das passive UHF-Element,
Quelle: Schwock (2010), S. 272.

Durch Kombination von aktiven und passiven Elementen passen sich UHF-Vorrichtungen in kürzester Zeit an die jeweilige Werkstückgeometrie an. Im Vergleich zu den Hard Tool entfällt der Austausch der Vorrichtung bei neuen Bauteilen und erhöht somit die Produktivität und Flexibilität des gesamten Fertigungsprozesses.⁴

⁴ Vgl. Schwock (2010), S. 274.

4 Konzeptfindung

Der erste Schritt für die Realisierung eines funktionsfähigen Prototyps führt über die Erarbeitung von Lösungsansätzen, welche unter stetigem Abgleich, mit den im Vorhinein festgelegten Zielen und Rahmenbedingungen, durchgeführt werden. Begonnen wird dabei mit einer Recherche von bereits vorhandenen Patenten im Spannvorrichtungssektor, um mögliche Patentverletzungen bereits im Voraus auszuschließen. Anschließend wird die Recherche auf bestehende Konkurrenzprodukte, welche sich bereits am Markt befinden, erweitert, um in weiterer Folge mit den gewonnenen Informationen und Erkenntnissen zielführende Konzepte zu entwickeln. Unterstützt wird der Konzeptfindungsprozess von unterschiedlichen Bewertungstechniken wie dem morphologischen Kasten bzw. dem Paarvergleich. Schlussendlich werden die erfolgversprechendsten Lösungsvorschläge detailliert ausgearbeitet und kosten-technisch gegenübergestellt.

4.1 Patentrecherche

Der Begriff „universelle Vakuum-Spannvorrichtung“ ist sehr allgemein gehalten und lässt großen Interpretationsspielraum, wie solch eine Vorrichtung aussehen kann. Um Klarheit zu schaffen, in welche Richtung die Entwicklung gehen kann, führt kein Weg an der Durchführung einer Patentrecherche vorbei. In der weltweit öffentlich zugänglichen Patentdatenbank befindet sich eine Unmenge an technischem Wissen, welches den Einstieg in das Themengebiet erleichtern kann. Mithilfe der Recherche soll vorerst ein Stand der Technik im Spannvorrichtungssektor ermittelt werden. Dadurch wird aufgezeigt, in wie weit die Spanntechnologien ausgereift sind und welche unterschiedlichen Lösungsmöglichkeiten bereits zu Papier gebracht worden sind. Diese Erkenntnisse können in weiterer Folge für die Konzeptfindung genutzt werden und als Anreiz für neue Ideen dienen.

Des Weiteren werden durch die Recherche Patentverletzungen von bereits angemeldeten bzw. erteilten Patenten vermieden. Ein vermeintlich innovativer Lösungsvorschlag wird dadurch durchleuchtet und eventuell frühzeitig als Streitpotential auf juristischer Ebene entlarvt. Folgend wird gezeigt, wie an die Recherchetätigkeit herangegangen wird und welche Ergebnisse daraus resultieren.

4.1.1 Vorgehensweise

Für die Durchführungen der Recherchearbeiten werden die online zugänglichen nicht kommerziellen Patentdatenbanken der Patentämter genutzt. Dazu zählt hauptsächlich das Recherchetool des europäischen Patentamtes, Espacenet, sowie des Deutschen Patent- und Markenamtes, DEPATISnet. Als zusätzliche Hilfestellung erweist sich das freie Recherchetool von Google Patents, da es sehr einfach aufgebaut und intuitiv zu bedienen ist.

Zu Beginn der Nachforschungen wird klar, dass mit dem Suchbegriff „Spannvorrichtung“ tausende Ergebnisse von den Suchmaschinen vorgeschlagen werden und der Überblick verloren geht. Diese Erkenntnis fordert eine strukturiert durchgeführte Patentrecherche, weshalb als Erstes mit der Definition von Suchbegriffen begonnen wird. Dabei werden Synonyme, wie

Spannsysteme, Spanngeräte etc. gebildet und in einem Dokument mitnotiert. Parallel dazu werden die Wörter in die englische Sprache übersetzt, da ein Großteil der Patentschriften auch in Englisch erhältlich ist. Dasselbe Schema wird mit Adjektiven durchgeführt, die eine spezielle Eigenschaft der Anlage beschreiben, beispielsweise universell, flexibel, anpassungsfähig, konfigurierbar, etc.

Die ersten Suchergebnisse werden ausgewertet und aussortiert, indem hauptsächlich auf Figuren eingegangen wird und die Hauptansprüche durchforstet werden. Wird ein Patent als hilfreich erachtet, so wird es tabellarisch mit den wichtigsten Informationen dokumentiert, wie in Tabelle 1 ersichtlich. Zu diesen Informationen zählen unter anderem die Patentnummer, aus welcher hervorgeht, ob es sich um eine Anmeldung oder Erteilung handelt, die Bezeichnung und eine kurze Beschreibung, welche die Kernelemente der Patentschrift zusammenfasst, sowie den Anmelder des Dokumentes. Die Namen der Anmelder bzw. Erfinder werden für eine erweiterte Suche genutzt, da meist der Unternehmensname eingetragen ist und so in weiterer Folge der Grundstein für die in Kapitel 4.2 beschriebene Produktrecherche gelegt ist. Zum besseren Verständnis wird noch ein Bild angefügt, das die Grundfunktion der Patentschrift am besten wiedergibt, sowie ein Hyperlink zum Online-Patentdokument für den Fall, dass detailliertere Informationen benötigt werden.

Nummer:	US5364083 A	
Bezeichnung:	Universal holding fixture end effector	
Beschreibung:	Pogostick-Säulen mit Linearmotor (z-Achse)	
Anmelder:	The Boeing Company	
Anmerkung:	Patent ausgelaufen	
Link:	https://www.google.de/patents/US5364083	

Tabelle 1: Beispiel für die Dokumentation der Patentrechercheergebnisse,
Quelle: Ross/Gannon (1994), Schutzrecht US 5364083 A, S. 1.

Die wichtigste Frage, die sich während einer Patentrecherche eröffnet, lautet: „Ist das Patent noch gültig?“ Aufschluss liefert der sogenannte Patentstatus, welcher über das jeweilige Landesregister abgefragt werden kann. Wird beispielsweise der Status einer deutschen Patenterteilung benötigt, so wird dieser über die Registerdatei des Deutschen Patentamtes geprüft (DPMAregister).

Jedes Patentdokument enthält einleitend eine kurze Beschreibung über den Stand der Technik, auf welchen die jeweilige Erfindung aufgebaut wurde. Diese Informationen beziehen sich auf bereits vorhandene Patentschriften und werden übersichtlich unter den sogenannten Patentziten angeführt. Diese Zitate sind meist mit Verlinkungen versehen und ermöglichen eine praktische Suchmethodik, um Patente ausfindig zu machen, die sich mit demselben Themengebiet auseinandersetzen. Diese Vorgehensweise ist dennoch mit Vorsicht zu genießen, da durch die vielen Verlinkungen sehr schnell der Überblick verloren geht.

4.1.2 Ergebnisse

Anhand der zuvor beschriebenen Vorgehensweise bei der Patentrecherche ergibt sich eine Vielzahl an unterschiedlichen Patentschriften, die eine Sortierung in Themengebiete erfordern. Diese lauten wie folgt und werden anschließend näher erläutert (siehe Abbildung 7).⁵

- Spannvorrichtungen mit fixen Raster (1);
- Spannvorrichtungen mit NC-gesteuerten Achsen (2);
- Magnetspannsysteme (3);
- Vakuumspannsysteme (4).

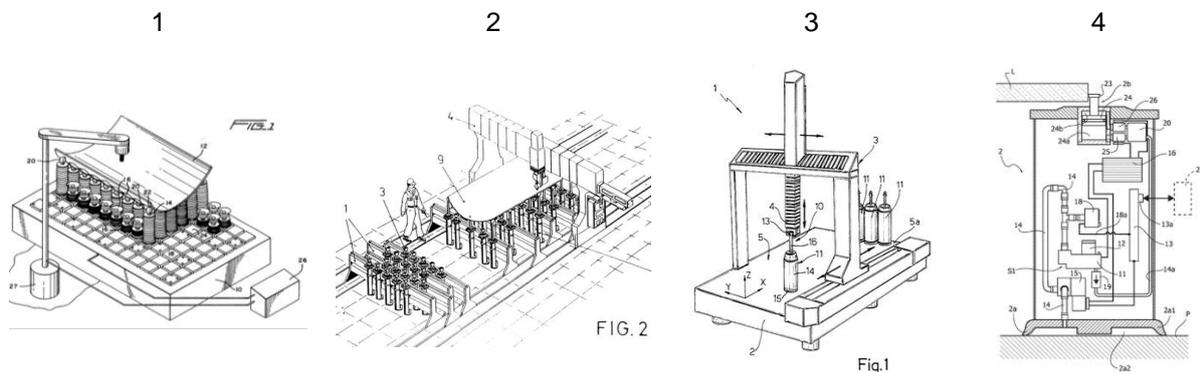


Abbildung 7: Beispielbilder zu Themengebieten der Patentrechercheergebnisse, Quelle: Europäische Patentorganisation (o.J.), Onlinequelle [02.02.2016].

Spannvorrichtungen mit fixem Raster (1)

Darunter versteht man universelle Spannvorrichtungen bestehend aus einem Unterbau mit einem fixen Raster an Säulenführungen, den Spannsäulen selbst und einer Steuerung inkl. Antriebe zur Manipulation der Säulen. Die Systeme arbeiten alle samt mit Säulen, die in ihrer Länge verstellt werden können. Am Ende der Säulen befinden sich Vakuum-Sauger, die je nach Patentanmelder starr oder beweglich ausgeführt sein können. Dabei wird zwischen aktiven und passiven Systemen unterschieden. Der Großteil dieser Spannvorrichtungen wird aktiv ausgeführt. Das bedeutet, dass die Höhenverstellung jeder einzelnen Säule entweder mittels Servomotor, Pneumatik- oder Hydraulikzylinder verstellt wird. Unternehmen wie The Boeing Company und Par Systems, Inc. befinden sich unter den Anmeldern genannter Patentedokumente, wobei ein Großteil bereits als Stand der Technik angesehen wird.

Spannvorrichtungen mit NC-gesteuerten Achsen (2)

Im Unterschied zu den Spannsäulen die nur in einer fixen Position ihre Hubbewegung ausführen, wird bei diesen Maschinen jede Säule einzeln entlang zweier senkrecht zueinander stehenden Linearachsen eingestellt. Mithilfe einer numerischen Steuereinheit (NC) kann die Vakuumkopfposition innerhalb eines beschränkten Bereichs stufenlos entlang der Raumkoordinaten an die jeweilige Bauteilgeometrie angepasst werden. Dies garantiert eine höhere

⁵ Vgl. Europäische Patentorganisation (o.J.), Onlinequelle [02.02.2016].

Flexibilität im Vergleich zu Anlagen mit definierten Säulenordnungen. Unternehmen wie Martinez Manuel Torres und The Boeing Company schützen ihre Maschinenkonzepte, basierend auf dieser Grundidee.

Magnetspannsysteme (3)

Ein weiterer Schritt in Richtung universell positionierbare Vakuumsäulen zeigen Patentedokumente, die rekonfigurierbare Spannsysteme beschreiben, bei denen der Säulengrundkörper anhand magnetischer Kräfte mit der Auflagefläche verbunden wird. Die Säulen werden einzeln entweder über eine automatisierte Robotereinheit oder per Hand an die gewünschte Position bewegt und anschließend mittels Magnet fixiert. Um die für den Transport notwendigen Kräfte zu minimieren, wird ein Luftkissen zwischen Säule und Grundplatte erzeugt. Anhand der Patentantragssteller kann darauf zurückgeschlossen werden, dass jene Einheiten hauptsächlich für Messmaschinen im Automobilbereich Anwendung finden. Dazu zählen Firmen wie Hexagon Metrology S.p.A, Audi AG und General Motors Corporation.

Vakuumsäulen (4)

Analog zu den Magnetspannsystemen erfolgt hier die Fixierung zwischen Untergrund und Säule durch Vakuumsauger, die an der Unterseite der Säulen angebracht sind. Die Vakuumerzeugung spielt dabei eine entscheidende Rolle und kann in zwei unterschiedliche Ansätze gegliedert werden. Eine Möglichkeit sieht die Vakuumerzeugung an einer zentralen Stelle außerhalb des Spannbereichs vor und versorgt jede Säule durch eine Schlauchverbindung mit Vakuum. Demgegenüber wird jede Säule mit einer Vakuumpumpe, die im Innenbereich verbaut ist, ausgestattet und erzeugt sich ihre notwendige Vakuumleistung eigenständig.

Letzteres findet Anwendung im erteilten Patentedokument EP2682226B1. Aufgrund der Ähnlichkeit mit der in Kapitel 2 definierten Kernaufgabengebiete werden die Patentansprüche genauer untersucht, um im Vorhinein etwaige Patentverletzungen auszuschließen. Anhand der aufgezählten Haupt- und Nebenansprüche stellt das Dokument keine Bedrohung für die Entwicklung einer universellen Vakuumsäulen Vorrichtung dar, da der beschriebene Aktuator nur als pneumatischer Zylinder definiert wird. Das bedeutet, dass im Fall der Umsetzung eines ähnlich gewählten Konzeptes, für die Höhenverstellung kein pneumatischer Zylinder verwendet werden darf.⁶

Die Vakuumsäulen werden hauptsächlich zum Spannen von ebenen Platten aus Holz, Glas oder Marmor in Fräsmaschinen eingesetzt. Der italienische Holzbearbeitungsmaschinenhersteller BIESSE S.p.A. schützt seine innovativen Anlagenkonzepte durch Patentschriften, was aus den hunderten Patentanmeldungen abzuleiten ist.

Aufgrund der Menge an Informationen, die sich im Laufe der Recherche angehäuft haben, kann auf einen Trend in Richtung erhöhter Flexibilität im Spannvorrichtungsbereich rückgeschlossen werden. Maschinenbauer versuchen mit unterschiedlichsten Lösungsansätzen ein möglichst großes Spektrum an Bauteilen abzudecken zu können.

⁶ Vgl. Belli/Bindelli (2014), Schutzrecht EP 2 682 226 B1, S. 1 ff.

Aus den gewonnenen Daten kann neues Wissen generiert werden, welches in weiterer Folge auch in anderen Projekten zum Einsatz kommen kann und als Denkanstoß dienen soll. Der Informationsüberschuss, welcher am Beginn der Nachforschungen auftritt, unterstreicht die Wichtigkeit einer strukturiert durchgeführten Patentrecherche.

An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass das Instrument Patentrecherche während des gesamten Entwicklungsprozesses immer wieder zum Einsatz kommt und nicht nur auf den Anfang der Konzeptfindungsphase beschränkt ist.

4.2 Produktrecherche

Basierend auf den in Kapitel 2 definierten Kernaufgabengebieten werden Nachforschungen über bereits vorhandene Produkte am Markt getätigt, mit denen spezielle Einzelfunktionen des späteren Prototyps erfüllt werden. Mithilfe der zuvor durchgeführten Patentrecherche wurde die Grundlage für solch eine Produktrecherche geschaffen. Ziel ist es möglichst viele am Markt erhältliche Komponenten dort einzusetzen, wo sich deren Grundfunktion schon langjährig bewährt hat, damit der erforderliche Entwicklungsaufwand in einem überschaubaren Rahmen bleibt.

Als Recherchemedium werden hauptsächlich Onlinequellen und die von der Firma MICADO zur Verfügung gestellten Kontaktdaten von Zulieferfirmen genutzt.

4.2.1 Verbindung Säule zu Auflagefläche

Die Anbindung zwischen Säulengrundkörper und dem Untergrund stellt die Schlüsselfunktion im gesamten Entwicklungsprozess dar. Es gilt eine zuverlässige Schnittstelle zu finden, mit der eine freie Positionierbarkeit jeder Säule garantiert werden kann.

Magnetspannelemente⁷

Die im Zuge der Patentrecherche aufgegriffenen magnetischen Spannsysteme sind mit Magnetspannelementen im unteren Säulenbereich ausgerüstet. Eine erste Internetrecherche liefert eine Vielzahl an Herstellerfirmen, wobei sich zwei unterschiedliche Produktgruppen herauskristallisieren.

Einerseits werden sogenannte Magnetspanntische angeboten, welche zum Spannen von magnetisierbaren Werkstoffen für die spanende Nachbearbeitung, wie Drehen, Fräsen oder Schleifen zum Einsatz kommen. Je nach Verwendungszweck unterscheiden sich die Magnettypen in der Anordnung der Pole zueinander. Für rotationsymmetrische Werkstücke werden permanent Magnetspannfutter mit Radialpolteilung angewendet, da das Bauteil aufgrund der Polanordnung in Richtung Achsmittle zentriert wird. Dem gegenüber steht die sogenannte Quadratpoltechnik. Die quadratisch geformten Pole sind in einem Schachbrettmuster abwechselnd mit Nord- und Südpol aneinandergereiht. Im Vergleich zur Radialpoltechnik können somit höhere Haltekräfte erzielt werden, weshalb die Technologie hauptsächlich zur Schruppbearbeitung in Fräsmaschinen eingesetzt wird.

⁷ Vgl. Assfalg GmbH (2014), Onlinequelle [02.02.2016].

Die zweite Produktgruppe wird von den Hebemagneten vertreten, deren Anwendungsgebiet den Transport von schweren ferromagnetischen Lasten mithilfe von Kransystemen darstellt. Wie bei den Magnetspanntischen werden die Permanentmagnete der Hebemagnete durch zusätzliche Neodym-Magnete verstärkt. Mit diesem Werkstoff lassen sich sehr hohe Haltekräfte erreichen.

Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Systemen besteht in der Bauweise. Während die Magnetspanntische, bedingt durch den begrenzten Arbeitsraum der Bearbeitungsmaschinen, eine geringe Bauhöhe aufweisen, besitzen Hebemagnete eher würfelförmige Außenabmessungen.

Die Ansteuerung bzw. Umpolung der Magnete kann mechanisch über einen einfachen Hebel, pneumatisch oder elektrisch erfolgen. Der wesentliche Vorteil besteht darin, dass nur zum Ein- bzw. Ausschalten der Magnethaltekraft eine Energiezufuhr notwendig ist. Der Schaltzustand bleibt solange erhalten, bis wieder ein Steuersignal angelegt wird.



Abbildung 8: Produktrecherche von Magnetspannelementen; Radialpolmagnet (links),
Quadratpolmagnet (mitte), Hebemagnet (rechts),
Quelle: Assfalg GmbH (2014), Onlinequelle [02.02.2016].

Vakuumsplanelemente⁸

Die Firma HORST WITTE Gerätebau Barskamp KG ist auf Spannsysteme spezialisiert und bietet unter anderem auch Sonderlösungen in der Vakuumsplanelemente an. Der in Abbildung 9 dargestellte Vakuumstandfuß zählt zu solch einer Sonderlösung und seine Funktionsweise wird unter dem deutschen Gebrauchsmuster DE202009006437U1 geschützt. Die Vakuumzeugung erfolgt über eine integrierte Vakuumpumpe, welche über eine Akkubatterie mit Strom versorgt wird. Hauptanwendungsgebiet sind mobile Messtaster, die an der Oberseite befestigt und über den Vakuumfuß an ebenen Auflageflächen positioniert werden können. Mit einem mechanischen Schalter wird die Miniaturpumpe eingeschaltet und bewirkt eine Haltekraft zwischen Fußunterseite und Auflagefläche. Integrierte Kontrollleuchten und ein Manometer übernehmen die Vakuumüberwachung.⁹

Alternativ bietet die Firma Raster-Vakuumsplaneplatten an, welche zum Spannen von großflächigen Bauteilen eingesetzt werden. Je nach Bauteilabmessungen und -form wird in die sich kreuzenden Nuten eine Dichtschnur eingelegt und anschließend die Spannplatte an ein externes Vakuummaggregat angeschlossen. Für einen ordnungsgemäßen Einsatz wird vorausgesetzt, dass die Werkstückoberfläche auf der Spannseite keine großen Unebenheiten aufweist, da es ansonsten zu hohen Vakuumleckagen kommen kann und somit die Halte-

⁸ Vgl. Horst Witte Gerätebau Barskamp KG (2014), Onlinequelle [02.02.2016].

⁹ Vgl. Witte (2009), Schutzrecht DE 20 2009 006 437 U1, S. 1 ff.

kräfte verringert werden. Im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Magnetspanntischen können mit diesen Spannsystemen auch nicht-magnetische Werkstoffe fixiert werden.



Abbildung 9: Produktrecherche von Vakuumspannelementen, Vakuumfuß (links), Rasterspannplatten (rechts),
Quelle: Horst Witte Gerätebau Barskamp KG (2016), Onlinequelle [02.02.2016].

Mechanische Schnellspannelemente¹⁰

Im Laufe der Nachforschungen tauchen immer wieder Spannvorrichtungshersteller von Schnellspannsystemen auf. Darunter versteht man meist formschlüssige Verbindungen zwischen Auflageplatte und Bauteilgruppen, die in kürzester Zeit montiert und wieder gelöst werden können.

Eine Möglichkeit der rüstzeitsparenden Montage bieten Nullpunktspannsysteme. Sie bestehen aus einem am Bauteil befestigten Zentrierzapfen und dem auf der Auflagefläche montierten Spanntopf. Bei der Montage wird der Zentrierzapfen auf den Spanntopf geschoben und über Rastbolzen, die mit Federpaketen vorgespannt sind, in seiner Position fixiert. Das Lösen der Verbindung geschieht mithilfe pneumatischer Ansteuerung der Rastbolzen. Nullpunktspannsysteme zeichnen sich durch ihre kompakte Bauweise und ihre hohe Positionier- und Wiederholgenauigkeit, die unter anderem auf eine konische Zentrierung zurückzuführen ist, aus.

Die kostengünstigere Alternative stellen mechanisch oder pneumatisch betätigte Schnellspanner dar. Die kraftschlüssige Verbindung wird meist über einen exzentrischen oder über einen Totpunkt bewegten Mechanismus aufgebracht. In Kombination mit einem mit Nuten versehenen Maschinentisch, können die Spannelemente einfach in nahezu jeder Position befestigt werden.

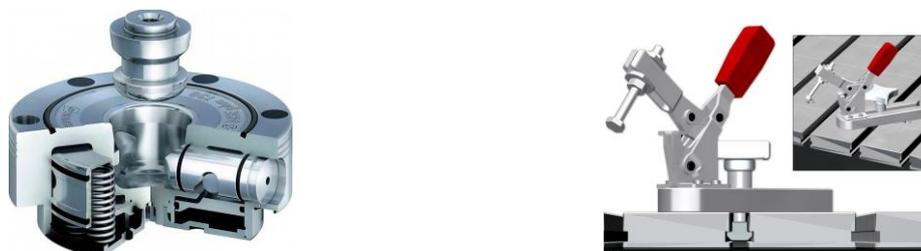


Abbildung 10: Produktrecherche von mechanischen Schnellspannelementen, Nullpunktspannsystem (links), Schnellspanner (rechts),
Quelle: SCHUNK GmbH & Co. KG (2016), Onlinequelle [02.02.2016].

¹⁰ Vgl. SCHUNK GmbH & Co. KG (2016), Onlinequelle [02.02.2016].

4.2.2 Energieversorgung in Säule

Unabhängig davon, welche Medien der spätere Prototyp zur Erfüllung seiner Funktionen benötigt, wird im Vorhinein eruiert, welche Eventualitäten, zur Versorgung jeder einzelnen Säule mit Energie, in Frage kommen können. Dabei ist auf die in Kapitel 2 definierten Zielsetzungen Rücksicht zu nehmen, im speziellen, dass die Energieversorgung ohne fix verbundene Kabel oder Schläuche zu erfolgen hat. Mögliche Versorgungsmedien können Strom, Druckluft oder Vakuum sein.

Stromversorgung

Eine Möglichkeit, abgesehen von einem direkten Kabelanschluss, jede Säule mit Strom zu versorgen, bietet ein integrierter Batteriespeicher. Das begrenzte Speichervermögen und die geringe Langlebigkeit müssen dabei als kritisch betrachtet werden.

Aufgrund der Analogie der Problematik von aktuellen Mobilfunkgeräten am Markt liefert eine Internetrecherche die Möglichkeit, den Handyakku kabellos wieder aufladen zu können. Laut einem in der Fachzeitschrift Power Electronics veröffentlichter Artikel ist es Forschern gelungen, Strom drahtlos über eine Entfernung von 5 Meter zu übertragen. Ein Leistungsverlust von über 90% und die begrenzte Leistungsübertragung führen zur Erkenntnis, dass diese Technologie noch nicht ausgereift und noch einige Jahre an Forschungsarbeit benötigt, bis die Marktreife gegeben ist.¹¹

Für industrielle Zwecke werden zur berührungslosen Energie- und Datenübertragung sogenannte induktive Koppler eingesetzt. Sie ermöglichen Leistungsübertragungen von bis zu 12 Watt, wobei der Abstand zwischen Sender und Empfänger maximal 5mm betragen darf.¹²

Vakuumversorgung¹³

Die Tatsache, dass Vakuum als Spanntechnologie eingesetzt werden muss, verlangt nach einer zuverlässigen Lösung der Problematik. Die Nachforschungen beziehen sich dabei auf die bei der Patentrecherche gewonnenen Ergebnisse im Bereich der Vakuumspannsysteme, welche eine Unterscheidung zwischen interner oder externer Bereitstellung von Vakuum vornehmen.

Für die interne Vakuumerzeugung können Vakuumpumpen in kompakter Bauweise eingesetzt werden. Die Firma SCHMALZ bietet Trockenläufer-Pumpen basierend auf dem Vielzellen-Verdichterprinzip in robuster und wartungsarmer Ausführung an. Bei einer Spannungsversorgung von 12V DC und einer Nennleistung von 50 Watt kann ein maximaler Absolutdruck von 220mbar erreicht werden.

Eine stromlose Alternative lässt sich mit Ejektoren mit verbauten Venturi-Düsen realisieren. Sie benötigen für die Vakuumerzeugung anstelle von Strom Druckluft, welche in diesem Anwendungsfall über einen in der Säule platzierten Druckluftspeicher bereitgestellt werden kann. Ejektoren zeichnen sich besonders durch ihren geringen Platzbedarf und den vielseitigen Einsatzmöglichkeiten, aufgrund der unterschiedlichen Bauformen, welche mit intelligenten Funktionen für die Energie- und Prozesskontrolle ausgestattet werden können, aus.

¹¹ Vgl. Park u.a. (2015), S. 817-827

¹² Vgl. Balluff GmbH (2016), Onlinequelle [02.02.2016].

¹³ Vgl. J. Schmalz GmbH (2016), Onlinequelle [02.02.2016].

Für den Fall, dass die Vakuumpumpe außerhalb der Spannvorrichtung platziert ist, muss eine verlässliche Schnittstelle mit geringstmöglichen Leistungsverlusten zwischen jeder einzelnen Säule und der Vakuumerzeugung garantiert werden. Zusätzlich erschwert die Vorgabe der freien Positionierbarkeit die Problemlösung. Einen ersten Anhaltspunkt liefert die Tatsache, dass jede Säule als einziger physikalischen Kontakt die Verbindung zur Auflagefläche aufweist. Basierend auf dem Konzeptvorschlag, die Auflagefläche mit Ventilen auszustatten, die nur ein Durchschalten des Vakuums ermöglichen, wenn eine Säule auf ihnen positioniert wird, gilt es Produktlösungen für jene Ventile zu ermitteln.

Viele Vakuumpumpehersteller führen in ihrem Produktsortiment sogenannte Strömungsventile. Sie werden unmittelbar am Vakuumpumpekopf befestigt und verhindern bei nicht belegten Saugern einen Zusammenbruch des Vakuums, indem eine eingebaute Kugel über den Volumenstrom gegen den Ventilsitz gedrückt wird. Da im vorliegenden Anwendungsfall die Ventile in der Grundplatte montiert werden, stellt sich nach Rücksprache mit dem Ventilhersteller FIPA heraus, dass die Ventile direkt am Sauger montiert werden müssen, damit die Funktionsfähigkeit garantiert werden kann.

Die in Abbildung 11 rechts dargestellten magnetischen Durchschaltventile sind im Vergleich zu den Strömungsventilen genau für diesen Einsatz geeignet. Das für den Schaltzustand ausschlaggebende Ventilglied ist als Magnet ausgeführt. Wird ein ferromagnetischer Körper in der Nähe der Oberseite des Ventils positioniert, so wird durch die magnetische Wechselwirkung der Magnet vom abgedichteten Ventilsitz angehoben und öffnet somit die Vakuumleitung. SCHMALZ setzt diese Technologie zum Spannen von Holzplatten in Holzbearbeitungsmaschinen ein, was die Eignung für raue Umgebungsbedingungen bestätigt. Zwischen Werkstück und Spanntischoberfläche werden Blöcke an den gewünschten Stellen positioniert, welche auf beiden Seiten mit Dichtlippen versehen sind. Über die Blöcke werden die Magnetventile geöffnet und durch anschließenden Aufbau des Vakuums, Haltekräfte auf Ober- und Unterseite erzeugt.

Das von der Firma ZIMMER patentierte Magnetventil (EP1814697 B1) ermöglicht durch einen eigenen Vorsteuerkanal sogar einen Schaltvorgang unter bestehenden Vakuumpumpe.¹⁴



Abbildung 11: Produktrecherche zur Vakuumpumpeversorgung; Vakuumpumpe (links), Strömungsventil (mitte), magnetische Durchschaltventile (rechts), Quelle: J. Schmalz GmbH (2016), Onlinequelle [02.02.2016].

¹⁴ Vgl. Zimmer u.a. (2010), Schutzrecht EP 1 814 697 B1, S. 1. ff

4.2.3 Kommunikation

Unter dem allgemeinen Begriff Kommunikation wird in Bezug auf die Entwicklung einer Vakuumspannvorrichtung der notwendige Informationsaustausch zwischen der zentralen Steuereinheit und jeder einzelnen Säule verstanden.

Angenommen, dass z.B. jede Säule mit einer integrierten Vakuumpumpe und Batterie ausgestattet ist, stellt sich die Frage, wie kann die Hauptsteuereinheit allen Säulen mitteilen, wann das Vakuum aufgebaut werden darf. Für diesen konkreten Fall erscheint ein drahtloser Datenaustausch über eine industrietaugliche WLAN Schnittstelle am geeignetsten. Das bedeutet, dass jede Säule mit einem Kommunikationsmodul ausgestattet werden muss.

Ein weiteres Szenario stellt eine Vakuumversorgung über in der Grundplatte verbaute Durchschaltventile dar, wobei die Säulen über einen Elektro-Permanentmagneten fixiert werden. Hierfür wird bei der Positionierung der Säulen neben einer mechanischen Verbindung zwischen Manipulator und Grundkörper, zusätzlich eine Energie- und Kommunikationsschnittstelle zum Einschalten der Magnetspannelemente benötigt. All diese Eigenschaften ermöglichen Schnellwechselsysteme, die in der Automatisierungstechnik eingesetzt werden. Sie erzeugen ähnlich wie bei den Nullpunktspannsystemen eine formschlüssige Verbindung für den Transport von A nach B und besitzen zusätzlich noch integrierte Energiedurchführungsmöglichkeiten für fluidische Medien, sowie integrierte Steckverbinder zum Übertragen von elektrischen Signalen. Durch ihren hohen Automatisierungsgrad werden diese Systeme hauptsächlich als Roboterschnittstellen zum Handling von Greifern und Werkzeugwechseln verwendet. Abbildung 12 veranschaulicht, wie solch ein Schnellwechselsystem aussehen kann.¹⁵



Abbildung 12: Produktrecherche zur Kommunikation; Schnellwechselsysteme,
Quelle: SCHUNK GmbH & Co. KG (2016), Onlinequelle [02.02.2016].

Abschließend lässt sich über die Produktrecherche sagen, dass eine große Menge an technischen Lösungen bereits am Markt vorhanden ist. Oftmals kann der eigentliche Verwendungszweck von Produkten als potentieller Lösungsansatz für eine andere Aufgabe genutzt werden, wobei in weiterer Folge der Kostenfaktor nicht außer Acht gelassen werden kann.

¹⁵ Vgl. SCHUNK GmbH & Co. KG (2016), Onlinequelle [02.02.2016].

4.3 Konzeptentwicklung

Durch die in Kapitel 4.1 und 4.2 beschriebenen Recherchen entsteht eine Ansammlung an Informationen, die potentielle Lösungsvorschläge für das Endprodukt beinhalten. Damit der maximale Output aus dem gewonnenen Wissen generiert werden kann, bedient man sich an einer Kreativitätstechnik, welche für die vorliegende Problemstellung am geeignetsten erscheint, dem sogenannten morphologischen Kasten.

Das Grundprinzip des morphologischen Kastens besteht darin, komplexe Probleme in Teilproblem zu zerlegen, um anschließend separat für jedes Teilproblem Teillösungen zu entwickeln. Dadurch wird ein Katalog an Lösungsmöglichkeiten geschaffen, die miteinander kombiniert werden können, damit die optimale Gesamtlösung gefunden werden kann.¹⁶

Wird die Methodik für die Entwicklung einer universellen Vakuumspannvorrichtung angewandt, so erfolgt zu Beginn eine Unterteilung der Problemstellung in wichtige Merkmale, die eine Spansäule definieren. Zur besseren Nachvollziehbarkeit bei der Beschreibung der Vorgehensweise wird hiermit bereits auf die in Tabelle 2 dargestellte Endversion des morphologischen Kastens verwiesen.

Folgende Merkmale wurden festgelegt und in die erste Spalte der Matrix eingetragen:

- A. Grundkörperanbindung;
- B. Verbindung Säule zu Auflagefläche;
- C. Ausführung Säule;
- D. Verbindung Kopf zu Säule;
- E. Vakuumversorgung.

Im nächsten Schritt werden in der jeweiligen Zeile der Merkmalsausprägung Ideen festgehalten, mithilfe derer das jeweilige Teilproblem gelöst werden kann. Als Hauptquelle für mögliche Lösungsansätze werden die Ergebnisse aus der Patent- und Produktrecherche herangezogen, wobei eine ständige Aktualisierung der Matrix vonnöten ist. Schlussendlich erhält man einen Ideenkatalog, der einerseits die Recherchetätigkeiten zusammenfasst und die wichtigsten Informationen übersichtlich auf einen Blick darstellt und andererseits als Basis für die Lösungsfindung herangezogen wird. Es folgt eine kurze Beschreibung der wesentlichen Lösungsalternativen, die in Tabelle 2 dargestellt sind.

A Grundkörperanbindung

Unter der Grundkörperanbindung versteht man das prinzipielle Konzept, wie jede einzelne Säule im Raum positioniert wird. Mit einer frei positionierbaren Säule wird diese an jedem beliebigen Raumpunkt fixiert und wieder gelöst, ohne jegliche Einschränkung. Als Alternative bieten sich Befestigungspunkte für die Säulen an, die in einem Raster angeordnet sind. Der Nachteil, dass Positionen zwischen den Rasterpunkten nicht als Vakuumunterstützung genutzt werden, kann beispielsweise durch einen dementsprechenden Ausgleich am Vakuumkopf kompensiert werden. Schlussendlich gibt es noch die Möglichkeit, jede Säule mit einer Lineareinheit zu verbinden, welche die Positionierung entlang der Auflageebene übernimmt.

¹⁶ Vgl. Schawel/Billing (2012), S. 174-176.

B Verbindung Säule zu Auflagefläche

Das nächste Teilproblem beschäftigt sich mit der Verbindung zwischen den Säulen und der Auflagefläche. Unter den Lösungsvorschlägen befinden sich magnetische, vakuumtechnische und mechanische Spannelemente. Für detailliertere Informationen wird auf Kapitel 4.2.1 hingewiesen.

C Ausführung Säule

Hinter dem Begriff Ausführung Säule steckt der prinzipielle Aufbau des Säulengrundkörpers. Funktionen wie die Höhenverstellung (Z-Richtung) oder Bewegungen entlang der Auflageebene (X-Y Ebene) werden dabei unter die Lupe genommen. Für die Höhenverstellung besteht die Möglichkeit eine aktive oder passive Teleskopsäule mit Rundführung zu verwenden. Aktive Elemente werden beispielsweise durch einen integrierten Linearmotor in die gewünschte Position bewegt. Im Gegensatz dazu erfolgt bei passiven Säulen die Verstellung durch einen externen Manipulator. Anstelle von Rundführungen können auch handelsübliche Linearschienen mit Führungswagen eingesetzt werden. Höhere Anforderungen, wie eine Kopfpositionierung in allen Raumkoordinaten, ermöglichen parallelkinematische Positioniersysteme (z.B. Tripod). In ihrer einfachsten Form können Sie als kreisförmig angeordnete Gelenkstangen gesehen werden, die in Achsrichtung zusätzlich einen Längenausgleich zulassen. Dadurch können auch Drehbewegungen entlang der Raumkoordinaten erzielt werden. Unter dem Konzeptvorschlag des Baustein- bzw. Baukastensystems versteht man eine Vielzahl an einzelnen Säulenstücken die unterschiedliche Bauhöhen aufweisen. Die gewünschte Endhöhe jeder Säule wird nach und nach durch Aufsetzen der benötigten Bausteine erreicht. Das Endstück besteht aus einem stufenlos höhenverstellbaren Saugerkopf für die Feinjustierung.

D Verbindung Kopf zu Säule

Die Verbindung zwischen Vakuumkopf und Säulengrundkörper hat die Hauptaufgabe, dass sich der Kopf an die jeweilige Bauteilgeometrie optimal anpasst. Im Idealfall reicht ein kugelig gelagerter Gelenkkopf, der innerhalb seines maximalen Schwenkwinkels geklemmt werden kann. Für den Fall, dass zusätzlich ein Positionsausgleich, bedingt durch eine ungenaue Positionierung der Säule, gefordert wird, können Lösungsansätze wie ein exzentrischer Ausgleich oder eine Kreuzschlittenanordnung Abhilfe schaffen.

E Vakuumversorgung

Abschließend wird noch eine Vakuumversorgung am Kopf jeder Säule benötigt. Die grundlegenden Konzeptvarianten unterscheiden sich durch den Ort der Vakuumerzeugung. Für eine externe Versorgung sorgen Durchschaltventile die in der Auflagefläche montiert werden. Intern bestehen die Möglichkeiten einer eigenen Vakuumpumpe bzw. einem Druckluftspeicher in Kombination mit einer Venturidüse. In Kapitel 4.2.2 befindet sich eine detaillierte Beschreibung der genannten Lösungsansätze.

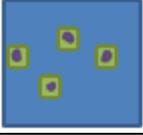
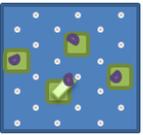
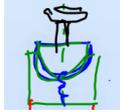
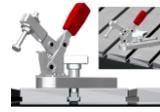
Merkmale		A	B	C	D	E
		Grundkörperanbindung	Verbindung Säule- Auflagefläche	Ausführung Säule	Verbindung Kopf - Säule	Vakuumversorgung
Ideen	1	frei positionierbar 	Magnetplatte 	Aktive Teleskopsäule 	Fixer Kugelkopf 	Ventil Bodendurchführung 
	2	rastergebunden 	Vakuum 	Passive Teleskopsäule 	mechanischer Exzenter 	Druckluftspeicher VENTURI 
	3	Lineareinheiten 	Nullpunktspannsystem 	Führungsschiene 	Teleskopkugelkopf 	Vakuumerzeuger Intern 
	4		Mechanisch Kraftschluss SCHRAUBEN 	Tripod 	Magnet 	Schlauchanschluss 
	5		Kupplung Schnellverschlüsse 	Gelenkstange 	Kreuzschlitten XY 	
	6			Bausteinsystem 		
	7			Keilsystem 		

Tabelle 2: Endergebnis morphologischer Kasten, Quelle: Eigene Darstellung.

Anhand des vorliegenden Katalogs in Tabelle 2 gilt es nun sich Schritt für Schritt an die bestmögliche Lösung heranzutasten. Die Entscheidungsfindung wird dabei durch Bewertungsmethoden wie den Paarvergleich unterstützt.

Der Paarvergleich hat zum Ziel, für festgelegte Kriterien die Gewichtung zu ermitteln und in weiterer Folge Ideen, durch Vergabe von Punkten für jedes Kriterium, paarweise zu vergleichen. Zum besseren Verständnis wird die Vorgehensweise beispielhaft an der Ausführung der Säule C zwischen Tripod und höhenverstellbarer Säule erläutert (Tabelle 3).

Zu Beginn der Methodik werden Kriterien festgelegt, anhand derer anschließend jede Idee einzeln bewertet werden kann. Die für den Aufbau der Säule ausschlaggebenden Merkmale

beinhalten den Preis, die Funktion, den benötigten Bauraum, die erzielbare Genauigkeit, sowie die Schnittstelle für die Energieversorgung des Grundkörpers. Sie werden in eine Tabelle in Matrixanordnung eingetragen, damit die Kriterien paarweise miteinander verglichen werden können. Dies bedeutet, dass jedes Zeilenkriterium mit jedem Spaltenkriterium abgewogen wird, ob eines der beiden Merkmale wichtiger ist als das andere. Wird die Zeile wichtiger als die Spalte erachtet, so werden 2 Punkte vergeben, andernfalls 0 Punkte. Bei Gleichwertigkeit wird 1 Punkt eingetragen. Nach vollständigem Ausfüllen der Matrix erhält man durch die Punktevergabe die Gewichtung als Ergebnis in Prozent. Tabelle 3 zeigt, dass bei der Ausführung der Säule die Genauigkeit mit 31,6% mit einer höheren Priorität einzustufen ist, als beispielsweise der Preis mit nur 5,3%.

Diese Gewichtung dient als Basis für die Benotung aller Lösungsansätze für das Teilproblem C, der Ausführung der Säule. Für den vorliegenden Fall wird jedes Kriterium separat für die Tripod-Variante bzw. Säule-Variante bewertet. Die Benotung erfolgt mit Punkten von 5 für „sehr gut“ bis zu 1 für „schlecht“.

Beim Vergleich der Endergebnisse erzielt das Säulenkonzept (3,24 Punkte) einen höheren Punktestand als der Tripod (2,79 Punkte). Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Tripod bezüglich Funktion, Bauraum und Preis mit einem Säulengrundkörper nicht mithalten kann. Der Vorteil einer höheren Genauigkeit kann diese Eigenschaften nicht kompensieren. Des Weiteren erscheint eine Vorrichtung mit einer Vielzahl an parallelkinematischen Positioniersystemen zu komplex. Der Gesamteindruck der Anlage darf den Kunden nicht abschrecken. Aus diesen Gründen bleibt für den weiteren Konzeptfindungsprozess der Fokus auf einem höhenverstellbaren Säulenkonzept.

Säule			Preis	Funktion	Bauraum	Genauigkeit	Schnittstelle	Summe	Gewichtung	Auswertung
Nr.	Kriterien	Note								
1	Preis	3,5		1	0	0	0	1	5,3%	0,18
2	Funktion	3	1		1	1	1	4	21,1%	0,63
3	Bauraum	4	2	1		1	0	4	21,1%	0,84
4	Genauigkeit	3	2	1	1		2	6	31,6%	0,95
5	Schnittstelle	3	2	1	1	0		4	21,1%	0,63
								19	100,0%	3,24

Tripod			Preis	Funktion	Bauraum	Genauigkeit	Schnittstelle	Summe	Gewichtung	Auswertung
Nr.	Kriterien	Note								
1	Preis	1		1	0	0	0	1	5,3%	0,05
2	Funktion	2	1		1	1	1	4	21,1%	0,42
3	Bauraum	2	2	1		1	0	4	21,1%	0,42
4	Genauigkeit	4	2	1	1		2	6	31,6%	1,26
5	Schnittstelle	3	2	1	1	0		4	21,1%	0,63
								19	100,0%	2,79

Tabelle 3: Beispiel für Paarvergleich,
Quelle: Eigene Darstellung.

Parallel zum Paarvergleich werden zur Entscheidungsfindung in Gruppenarbeit unterschiedliche Kombinationen an Lösungsansätzen gewählt und analysiert. Aus jeder Teilproblemmgruppe A-E wird ein Lösungsansatz gewählt, sodass deren Zusammensetzung einen vollständigen Konzeptvorschlag für eine universell einsetzbare Spannsäule ergeben. Die jewei-

ligen Konzeptvorschläge werden in der Gruppe diskutiert und die Vor- und Nachteile notiert. In die Diskussion fließen Kriterien wie Umsetzbarkeit, Komplexität oder Kosten ein. Zusätzlich erfolgt anhand der vorgegebenen Ziele und Rahmenbedingungen eine Bewertung, ob alle Forderungen einhaltbar sind.

Durch diese Methodik werden nicht relevante Lösungsansätze aus dem morphologischen Kasten eliminiert. Tabelle 4 zeigt den vereinfachten morphologischen Kasten mit den aussichtsreichsten Ideen. Die grün hinterlegten Teillösungen nehmen bereits vorweg, welches Konzept in die Realität umgesetzt werden soll. Die Forderung nach einer universell einsetzbaren Spannvorrichtung kann nur mit einer frei positionierbaren Grundkörperanbindung realisiert werden. Dies ermöglicht die Kombination einer Magnetspannplatte, für die Verbindung zwischen Säule und Auflagefläche, sowie in der Auflagefläche verbaute Durchschaltventile, die über das Magnetspannelement das Vakuum an den Spannungspunkt weiterleiten. Als Spannungspunkt wird ein bereits firmenintern fertiger Vakuumpkopf mit Kugelgelenk eingesetzt. Eine Lösung für die Ausführung des Säulengrundkörpers wird im Detail durchgeführt.

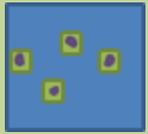
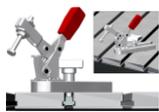
Merkmale						
	A	B	C	D	E	
	Grundkörperanbindung	Verbindung Säule- Auflagefläche	Ausführung Säule	Verbindung Kopf - Säule	Vakuumversorgung	
Ideen	1	frei positionierbar 	Magnetplatte 	Passive Teleskopsäule 	Fixer Kugelkopf 	Ventil Bodendurchführung 
	2	rastergebunden 	Mechanisch Kraftschluss SCHRAUBEN 	Bausteinsystem 	mechanischer Exzenter 	Druckluftspeicher VENTURI 
	3	Lineareinheiten 	Kupplung Schnellverschlüsse 		Teleskopkugelkopf 	Vakuumerzeuger Intern 

Tabelle 4: Morphologischer Kasten nach dem Auswahlverfahren, Quelle: Eigene Darstellung.

Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, werden unterschiedliche Konzepte für die passive Teleskopsäule bzw. das Bausteinsystem erarbeitet. Die jeweiligen Vor- und Nachteile der Konzepte werden eruiert und zusätzlich eine Kostenabschätzung aufgestellt. Für die Zukaufteile werden Angebote bei den Herstellern eingeholt und bei den Fertigungsteilen Angebote von bestehenden firmeninternen Konstruktionen als Vergleich herangezogen.

4.3.1 Konzept - passive Teleskopsäule

Unter dem Begriff der passiven Teleskopsäule versteht man einen starren Grundkörper zu dem sich ein höhenverstellbarer Körper, an dem der Vakuumkopf montiert wird, relativ bewegen kann. Passiv deshalb, da die Höhenverstellung von einem externen Manipulator vorgenommen wird. Dies bedeutet, dass nach dem Erreichen der gewünschten Position durch den Manipulator, die Säule in ihrer Lage geklemmt werden muss, damit die Bearbeitungskräfte während des Fräsprozesses aufgenommen werden können.

Teleskopschiene

Die Grundidee bei diesem Entwurf besteht darin, mit möglichst einfachen und kostengünstigen Standardkomponenten aus der Lineartechnik die Grundfunktionen zu erfüllen. Wie in Abbildung 13 ersichtlich, werden als Führungselemente zwei senkrecht zueinander stehende Führungsschienen, die auf der beweglichen Hohlwelle montiert sind, verwendet. Durch die 90°-Anordnung wird eine symmetrische bzw. richtungsunabhängige Durchbiegung bei Querkraftbelastungen gewährleistet. Die für die Momentaufnahme zuständigen Kugelwagen, sowie die Klemmelemente werden auf dem fixen Säulengrundkörper befestigt. Im Ruhezustand werden die Klemmelemente über Federpakete an die Führungsschienen gepresst, wodurch die Positionsfixierung auch im energielosen Zustand garantiert wird. Der Klemmmechanismus wird durch pneumatische Ansteuerung aufgehoben. Die Energieversorgung des Vakuumkopfes erfolgt über den Innenbereich der Hohlwelle.

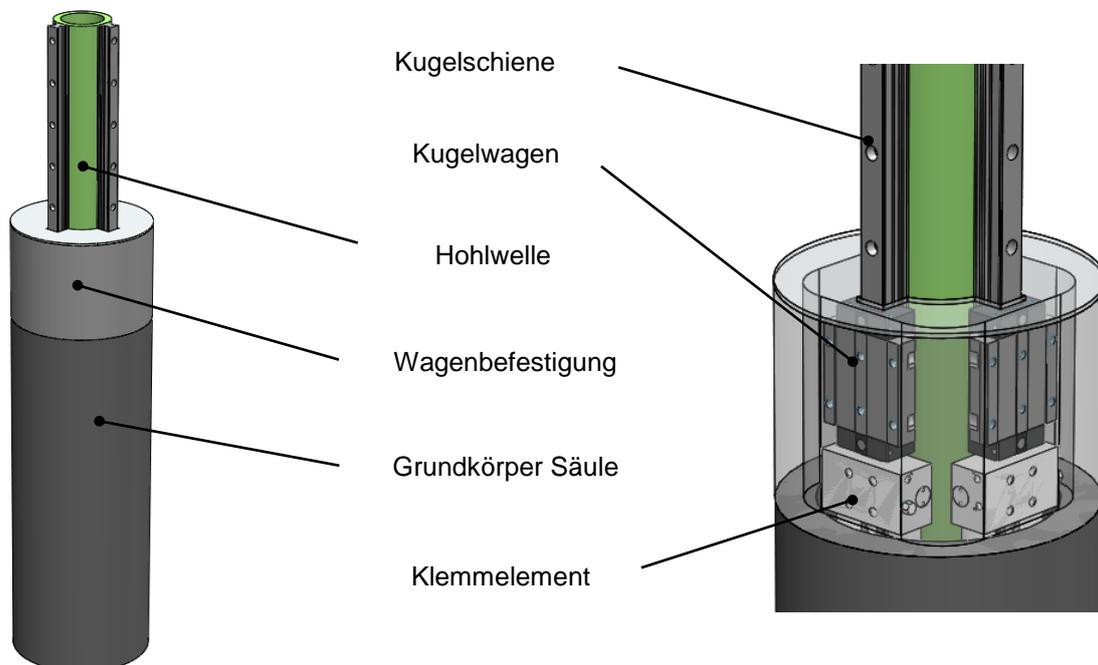


Abbildung 13: Konzept passive Säule: Teleskopschiene,
Quelle: Eigene Darstellung.

Eine Auflistung der benötigten Komponenten inklusive der Kosten ist in Tabelle 5 zu finden. Aufgrund der Verwendung von Standardkomponenten lässt sich ein kostengünstiger Ge-

samtpreis von ca. 1540€ je Säule erzielen. Die angegebenen Preise beziehen sich jeweils auf eine Mindestbestellmenge von 80 Stück.

Firma	Beschreibung	Menge	Kosten pro Stück
HREITER	Kugelwagen, Größe 20	2	89,86 €
HREITER	Kugelschiene, Größe 20	2	148,20 €
ZIMMER Group	Klemmelement, pneumatisch, Größe 20	2	370,20 €
MICADO	Grundkörper Wagenbefestigung, Aluminium	1	~300,00 €
MICADO	Hohlwelle $\varnothing 80 \times \varnothing 60 \times 700 \text{mm}$	1	~180,00 €
MICADO	Grundkörper Säule fix, Aluminium, $\varnothing 200 \times \varnothing 150 \times 600 \text{mm}$	1	~450,00 €
Gesamtsumme			1538,26 €

Tabelle 5: Konzept Teleskopschiene: Benötigte Komponenten,
Quelle: Eigene Darstellung.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Verdrehsicherung der Führungswelle ✓ Standardkomponenten ✓ Einstellbarkeit ✓ kostengünstig 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Abdichtung der Schienen gegen Frässtaub

Tabelle 6: Konzept Teleskopschiene: Argumentenbilanz,
Quelle: Eigene Darstellung.

Rundführung - Klemmung hydraulisch

Bei diesem Konzept wird eine möglichst kompakte Bauform der Säulenführung und -klemmung angestrebt. Die Firma KOSTYRKA bietet kundenspezifische Klemmhülsen für Rundführungen an, die hydraulisch geklemmt werden. Der große Vorteil dieser Hülse ist, dass Sie gleichzeitig als Führungs- und Klemmkomponente eingesetzt werden kann. Das bedeutet, dass keine zusätzliche Führung für die Hohlwelle notwendig ist. Abbildung 14 veranschaulicht das Funktionsprinzip. Über das Federpaket wird eine Vorspannung erzeugt, die den Kolben gegen das Hydrauliköl drückt. Der Öldruck führt zu einer elastischen Verformung der geschlitzten Hülse, wodurch eine radial wirkende Klemmkraft auf die Führungswelle erzeugt wird. Das Lösen der Klemmung geschieht über Druckluft, die den Druckkolben gegen das Federpaket verschiebt, und somit den Öldruck wieder abbaut. Die hohen Fertigungskosten des Bauelements schlagen sich auf den Gesamtpreis von ca. 2000€ je Säule nieder. Des Weiteren müssen Wartungsintervalle für das Öl eingehalten werden, da im Laufe der Zeit Miniaturschleppverluste entstehen, die die Klemmkraft verringern. Durch die Verwendung von Radialdichtringen lassen sich Rundführungen sehr einfach gegen Frässtaub und andere Schmutzpartikel abdichten. Wie bei dem Teleskopschienenkonzept, erfolgt die Energieversorgung des Vakuumpkopfes über den Innenbereich der Hohlwelle.

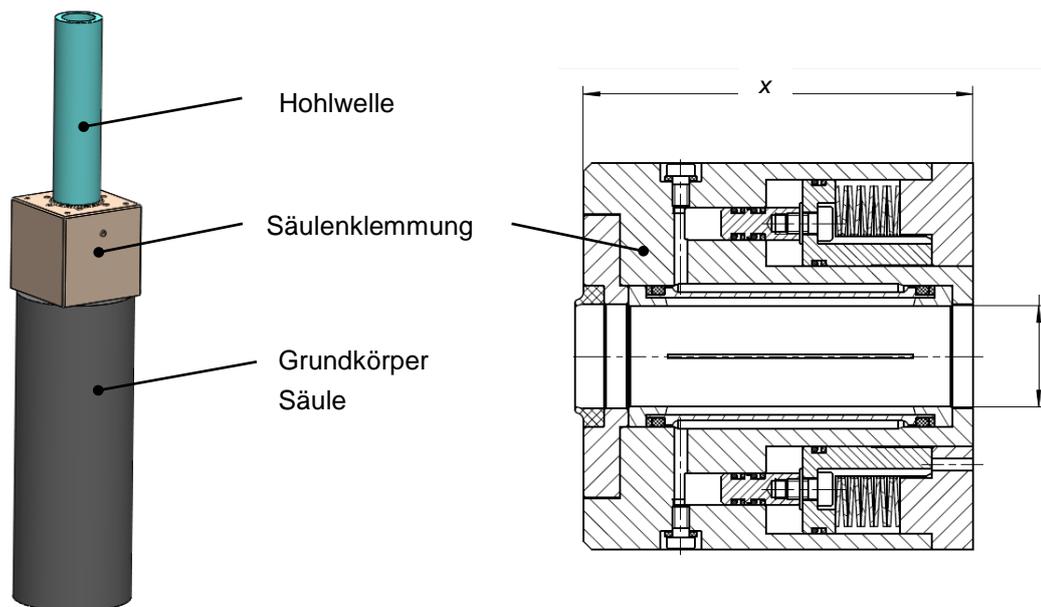


Abbildung 14: Konzept passive Säule: Rundführung - Klemmung hydraulisch, Quelle: Eigene Darstellung.

Firma	Beschreibung	Menge	Kosten pro Stück
KOSTYRKA	Klemmelement, pneumatisch-hydraulisch, $\varnothing 80\text{mm}$	1	1348,50 €
HREITER	Hohlwelle verchromt $\varnothing 80 \times \varnothing 60 \times 700\text{mm}$	1	205,66 €
MICADO	Grundkörper Säule fix, Aluminium, $\varnothing 200 \times \varnothing 150 \times 600\text{ mm}$	1	~450,00 €
Gesamtsumme			2004,16 €

Tabelle 7: Konzept Rundführung - Klemmung hydraulisch: Benötigte Komponenten, Quelle: Eigene Darstellung.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> ✓ All-In-One Lösung ✓ zusätzliche Führung entfällt ✓ hohe Klemmkraft 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Wartungsintervalle Öl ✗ teuer

Tabelle 8: Konzept Rundführung - Klemmung hydraulisch: Argumentenbilanz, Quelle: Eigene Darstellung.

Rundführung - Klemmung pneumatisch

Im Gegensatz zur hydraulischen Klemmvariante wird mit diesem Ansatz versucht, eine Rundführung mit kostengünstigeren Bauteilen zu realisieren. Der in Abbildung 15 skizzierte Konzeptvorschlag ähnelt im Grundaufbau der hydraulischen Klemmung. Der Unterschied zeigt sich in der Verwendung von Gleitlagern für den beweglichen Teil der Säule. Des Weiteren wird die Säulenklammer von einem pneumatisch lösbaren Klemmelement übernommen.

men, welches am unteren Ende der Rundführung montiert ist. Durch eine am Säulengrundkörper befestigte Welle kann das Klemmelement seine Haltekraft übertragen. Aufgrund des begrenzten Bauraumes im Inneren der Säule, muss die Druckluft- und Vakuumversorgung mit einer Energiekette außerhalb des Säulengrundkörpers umgesetzt werden. Mit einem Gesamtpreis von ca. 1600€ je Säule ist das pneumatische Klemmkonzept um 400€ billiger als die hydraulische Variante.

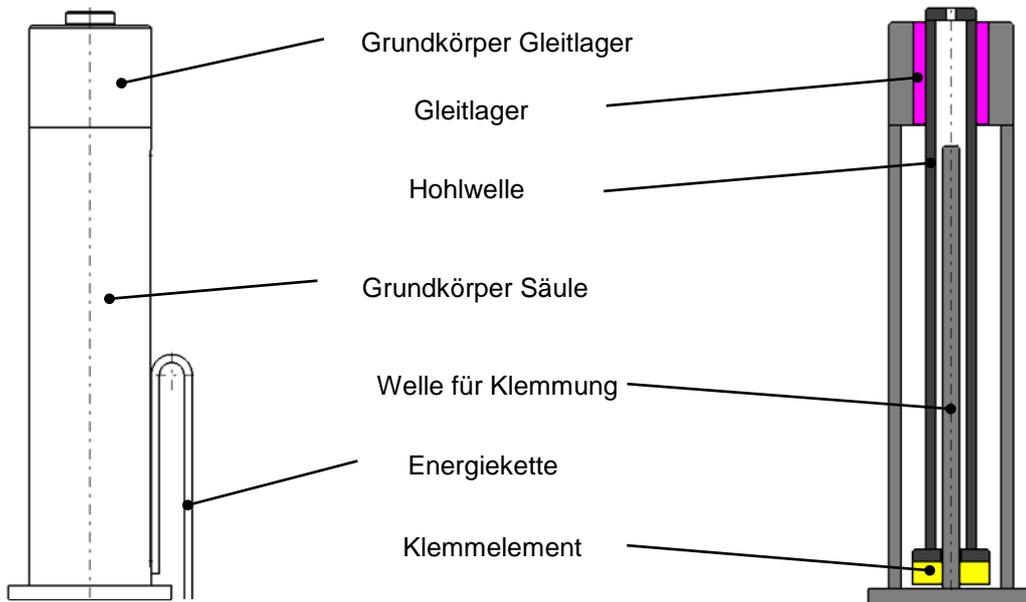


Abbildung 15: Konzept passive Säule: Rundführung - Klemmung pneumatisch, Quelle: Eigene Darstellung.

Firma	Beschreibung	Menge	Kosten pro Stück
ACE	Klemmelement, pneumatisch, $\varnothing 25\text{mm}$	1	255,71 €
HREITER	Hohlwelle verchromt, $\varnothing 80 \times \varnothing 60 \times 700\text{mm}$	1	205,66 €
GGB	Gleitlager, gespindelt, $\varnothing 80\text{mm}$	2	~200,00 €
MICADO	Grundkörper Gleitlager, Aluminium	1	~300,00 €
MICADO	Welle Klemmung $\varnothing 25\text{mm}$	1	~200,00 €
MICADO	Grundkörper Säule fix, Aluminium, $\varnothing 200 \times \varnothing 150 \times 600\text{mm}$	1	~450,00 €
Gesamtsumme			1611,37 €

Tabelle 9: Konzept Rundführung - Klemmung pneumatisch: Benötigte Komponenten, Quelle: Eigene Darstellung.

Vorteile	Nachteile
✓ kostengünstig	<ul style="list-style-type: none"> ✗ Energiekette außen ✗ Genauigkeit von Gleitlagerfertigung abhängig

Tabelle 10: Konzept Rundführung - Klemmung pneumatisch: Argumentenbilanz, Quelle: Eigene Darstellung.

4.3.2 Konzept - Bausteinsystem

Die zuvor beschriebenen Konzepte der passiven Teleskopsäulen haben allesamt ein großes Manko. Bedingt durch die Vorgabe (siehe Kapitel 2), dass ein Säulenhub von mindestens 500mm gewährleistet werden muss, ergibt sich im ausgefahrenen Zustand eine Gesamthöhe des Säulenaufbaus von mindestens 1300mm. Damit die geforderten Abweichungen bei einer Querkraftbelastung eingehalten werden können, muss die Konstruktion der Säule eine hohe Eigensteifigkeit aufweisen. Zusätzlich wird durch den langen Hebelarm die Momentenbelastung auf die Anbindung zwischen Säulenuntergrund und Auflagefläche erhöht.

Mithilfe eines Baukastensystems wird die Gesamthöhe der Konstruktion und somit auch die durch die Bearbeitungskräfte auftretende Belastung auf ein Minimum reduziert. Das Kernelement der Idee kann im Prinzip als verkürzte Version des Rundführungskonzeptes mit pneumatischer Klemmung gesehen werden. Anstelle des 500mm Hubs verfährt die Führungswelle mit dem befestigten Vakuumkopf nur noch maximal 100mm, wodurch die Gesamtbauhöhe stark verringert wird. Der restliche Höhenunterschied wird über einzelne Säulenstücke erreicht, die unterschiedliche Bauhöhen aufweisen und zwischen Magnetbaustein und dem höhenverstellbaren Endstück montiert werden. Dies bedeutet, dass je nach geforderter Säulenhöhe mit einem Baustein mit fix definierter Höhe die grobe Grundhöhe definiert und durch anschließendes Aufsetzen des variablen Bausteins die Feineinstellung durchgeführt wird. Zur mechanischen Verbindung zwischen den einzelnen Bausteinen werden Nullpunktspannsysteme eingesetzt. Sie besitzen die notwendige Wiederholgenauigkeit um Summentoleranzen so gering wie möglich zu halten. Für einen verlustarmen Vakuumtransport von der Auflagefläche bis zum Vakuumkopf muss eine zuverlässige Vakuumübergabe an den Bausteinschnittstellen installiert werden. Zusätzlich benötigt jeder Baustein eine Schnittstelle, damit er manipuliert werden kann.

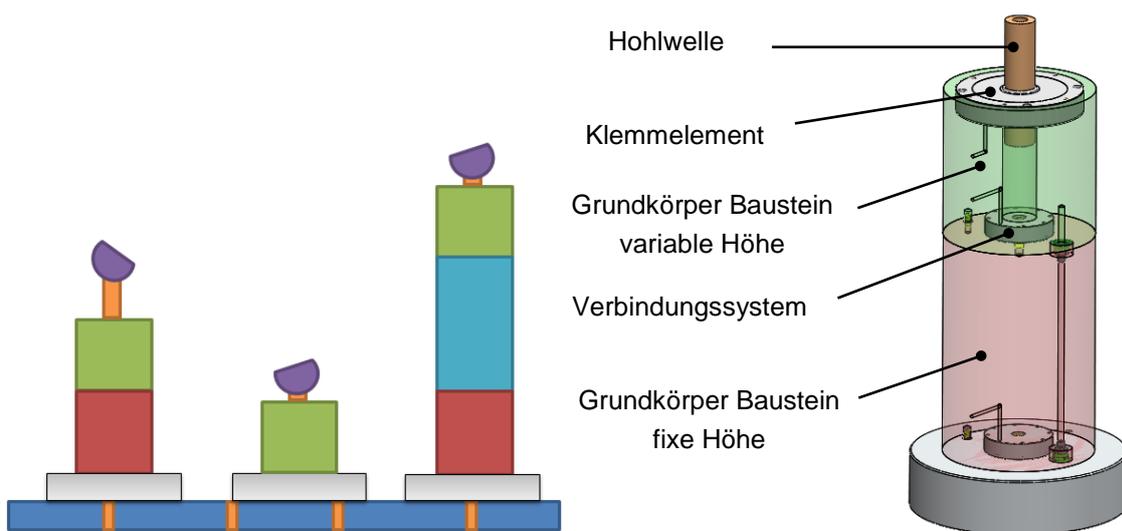


Abbildung 16: Konzept Bausteinsystem: Aufbau,
Quelle: Eigene Darstellung.

Ein weiteres Argument das für dieses System spricht, ist, dass auf Kundenwünsche flexibler reagiert werden kann. Wenn beispielsweise anstelle einer Spannsäule eine Abstecksäule gefordert wird, muss nur der oberste Baustein ausgetauscht werden. Die Gesamtkosten je Säule richten sich danach, wie viele unterschiedliche Bausteintypen benötigt werden (siehe Tabelle 11).

Firma	Beschreibung	Menge	Kosten pro Stück
ACE	Klemmelement, pneumatisch, ø40mm	1	~400,00 €
HREITER	Hohlwelle verchromt, ø40x150mm	1	~150,00 €
MICADO	Grundkörper Baustein variable Höhe, Aluminium	1	~300,00 €
	Verbindungssystem zwischen Bausteine	1	~400,00 €
Gesamtsumme (Baustein variable Höhe)			1250,00 €
MICADO	Grundkörper Baustein fixe Höhe, Aluminium	1	~350,00 €
	Verbindungssystem zwischen Bausteine	1	~400,00 €
Gesamtsumme (Baustein fixe Höhe)			750,00 €

Tabelle 11: Konzept Bausteinsystem: Benötigte Komponenten,
Quelle: Eigene Darstellung.

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> ✓ geringe Bauhöhe ✓ geringe Reaktionskräfte ✓ auf Kundenwünsche kann flexibler reagiert werden 	<ul style="list-style-type: none"> ✗ teuer

Tabelle 12: Konzept Bausteinsystem: Argumentenbilanz,
Quelle: Eigene Darstellung.

4.3.3 Zusammenfassung

Wie bereits erwähnt zeigen die grün hinterlegten Teillösungen in Tabelle 4 das Endergebnis der Konzeptentwicklung. Bei der Verbindung zwischen Säule und Auflagefläche wird das Magnetspannelement gegenüber den mechanischen Konzepten bevorzugt, da die Säulen unabhängig von einem Raster positioniert und fixiert werden können. Zusätzlich behalten Magnetspannelemente im Vergleich zu Vakuumspannelementen ihren Schaltzustand, im Falle eines Versagens der Energieversorgung, bei.

Die für die externe Vakuumversorgung zuständigen Durchschaltventile in der Auflagefläche setzen sich gegen die internen Versorgungsmöglichkeiten, wie Vakuumpumpe oder Druckluftbehälter mit Venturidüse durch, zumal bei beiden Varianten eine Stromversorgung notwendig ist, welche nur mit einer integrierten Batterie realisiert werden kann.

Um höchste Flexibilität gewährleisten zu können, wird der Säulengrundkörper im Bausteinprinzip umgesetzt. Der Aufbau ermöglicht eine kompakte Bauhöhe und universelle Einsatzmöglichkeiten, falls sich die Abmessungen der zu spannenden Bauteile ändern sollten. Zusätzlich besteht die Option den Endbaustein mit dem höhenverstellbaren, kugelgelenkgelagerten Vakuumkopf, durch Bausteine mit alternativen Spannkonzepten zu ersetzen.

4.4 Konzeptabsicherung

Bevor mit der Konstruktion begonnen wird, werden Vorabmessungen und Berechnungen durchgeführt, damit die theoretischen Annahmen in der Konzeptfindung bestätigt werden können bzw. Fehlentwicklungen frühzeitig erkannt werden. Bei den Vorabmessungen wird einerseits die Haltekraft des Magnetspannelementes, sowie das Schaltverhalten der Durchschaltventile für die Vakuumversorgung untersucht. Ziel ist es, mit möglichst geringem Kostenaufwand die Funktionalität der Kernkomponenten des gewählten Konzeptes zu untersuchen.

4.4.1 Magnetspannelement - Haltekraft

Die Hauptaufgabe der Magnetspannelemente ist eine lösbare Verbindung zwischen den Säulen und der Auflagefläche zu ermöglichen. Dabei müssen Sie im gespannten Zustand die Bearbeitungskräfte, die während des Fräsvorgangs auftreten, aufnehmen können und ihre fixierte Position beibehalten. Aus diesem Grund wird zuerst mit der Berechnung der notwendigen Mindesthaltekräfte des Magneten begonnen. Für die Berechnung wird der Extremfall angenommen, dass am Vakuumkopf bei maximaler Säulenhöhe eine Querkraftbelastung von 500N auftritt (siehe Abbildung 17). Eine weitere Einschränkung für das Magnetspannelement ergibt sich aus der Rahmenbedingung, dass ein Mindestabstand zwischen den angrenzenden Spannungspunkten von 300mm ermöglicht werden muss. Dadurch muss der Bauraum des Magneten innerhalb eines Durchmessers von 300mm liegen. Mit diesen Daten kann eine Vorauslegung der Magnethaltekraft F_{Merf} erfolgen (siehe Gleichung 1).

Querkraft	$F_Q = 500N$
Säulenlänge	$L = 1300mm$
Säulenbreite	$B = 300mm$

Momentensatz um Kippunkt:

$$\begin{aligned}\sum M_K &= 0 \\ F_Q L - F_{Merf} \frac{B}{2} &= 0 \quad (1) \\ F_{Merf} &= \frac{2F_Q L}{B} \\ F_{Merf} &= \frac{2 \times 500N \times 1300mm}{300mm} \\ F_{Merf} &= 4333,33N\end{aligned}$$

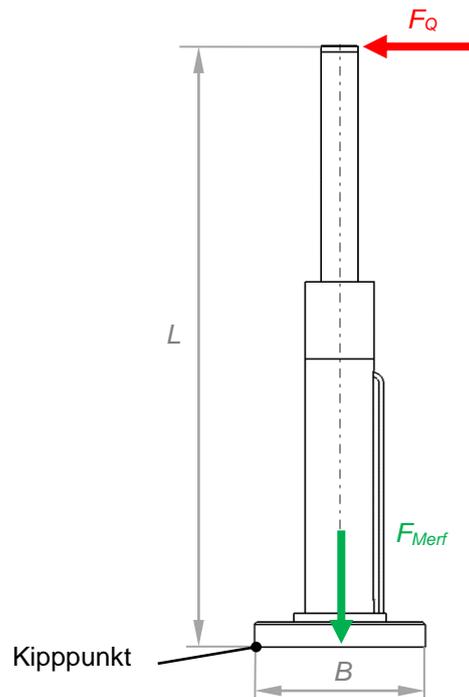


Abbildung 17: Freigestandene Säule durch Querkraftbelastung,
Quelle: Eigene Darstellung.

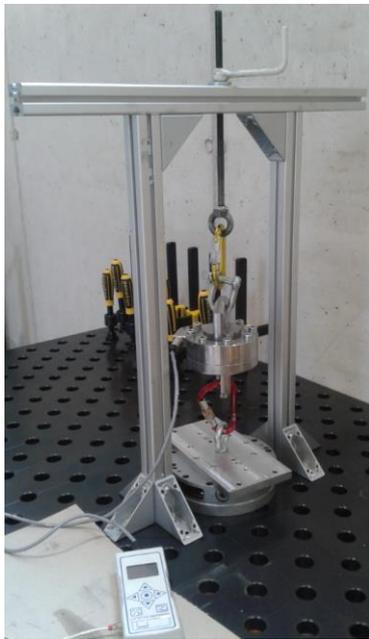
Anhand der geforderten Haltekraft von mindestens 4334N und den maximalen Abmessungen wird nach einer geeigneten Magnettechnik gesucht. Hierfür wird Kontakt mit Herstellern von Magnetspannelementen aufgenommen und der vorliegende Anwendungsfall beschrieben. In Gesprächen mit der Firma ASSFALG bzw. SCHUNK stellt sich heraus, dass Neodym-Magneten in Radialpoltechnik die Anforderungen erfüllen. Bei diesen Magnetrundfuttern sind die Magnetpole radial ausgerichtet und mit abwechselnder Polung im Kreis angeordnet. Sie werden hauptsächlich zum Spannen von rotationssymmetrischen Werkstücken angewendet. Von den Herstellern werden Mustermagnete für einen begrenzten Zeitraum für die darauffolgenden Testversuche zur Verfügung gestellt (Firma SCHUNK; Typ MSC-PM-35-150-63). Im Zuge der Recherche stellt sich heraus, welche Faktoren die Magnethaltekraft beeinflussen.¹⁷

- Abstand zwischen Magnet und Haftkörper (Luftspalt);
- Werkstoff und Härtegrad des Haftkörpers;
- Oberfläche des Haftkörpers;
- Richtung der Kraft;
- Dicke des Haftkörpers;
- Temperatur.

Abhängig davon werden bei den Messversuchen unterschiedliche Haftkörper für die Magnetisierung eingesetzt und deren Auswirkungen dokumentiert. Die Körper unterscheiden sich in Werkstoff, Oberflächenbeschaffenheit und Dicke: (siehe Abbildung 18)

¹⁷ Vgl. SAV Spann- Automations- Normteiletechnik GmbH (2014), Onlinequelle [02.02.2016].

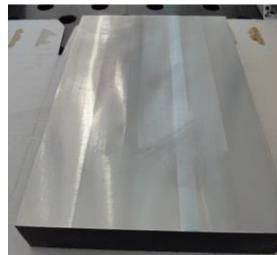
- Stahlplatte rund S235JR; Dicke: 42mm, unbearbeitet;
- Stahlplatte S235JR; Dicke: 8mm, unbearbeitet;
- Schweißtisch S355JR; Dicke: 25mm; plasmanitriert (HV500);
- Stahlplatte S235JR; Dicke: 40mm, Oberseite: gefräst, Unterseite: unbearbeitet.



Stahlplatte rund



Stahlplatte 8mm



40mm gefräst



40mm unbearbeitet

Abbildung 18: Messaufbau Radialpolmagnet inkl. Haftkörper,
Quelle: Eigene Darstellung.

Messaufbau Radialpolmagnet

Der Grundrahmen des Prüfstandes besteht aus einem Aluminiumprofilaufbau, wie in Abbildung 18 dargestellt. Der Ablauf einer Messung erfolgt nach folgendem Schema. Der Radialpolmagnet wird auf dem jeweiligen Haftkörper positioniert und durch Umlegen des mechanischen Schalters eingeschaltet. Zwischen der für die Kraftaufbringung zuständigen mechanischen Gewindespindel und dem Magneten ist ein elektrischer Kraftaufnehmer (TEST-GmbH, Modell 301, 50kN) montiert (siehe Kapitel 6.1). Dieser überträgt die Messwerte an ein angeschlossenes Anzeigergerät (TEST-GmbH, Modell 302 B) und wertet diese dort aus. Die Gewindespindel wird so lange gedreht, bis der Magnet vom Haftkörper durch die Überlastung angehoben wird. Am Display der Auswerteeinheit wird der maximale Wert in Newton angezeigt. Dieser entspricht der aufgetretenen Magnethaltekraft zwischen Radialpolmagnet und Haftkörper. Die Messungen werden für jeden Haftkörper mehrmals durchgeführt und der Mittelwert gebildet.

Die in Tabelle 13 aufgelisteten Messergebnisse zeigen sehr deutlich, dass die ermittelten Haltekräfte viel zu gering sind und nicht den theoretisch vorgegebenen Werten entsprechen. Je nach verwendetem Haftkörper erreicht der Betrag der maximalen Zugkraft nur 6-12% vom theoretisch angegebenen Wert. Eine Fehlfunktion des Magneten wird ausgeschlossen, da dieselben Ergebnisse mit einem baugleichen Magneten der Firma ASSFALG bestätigt wurden (Typ NS 20). Dies bedeutet, dass Magneten mit Radialpoltechnik für diese Anwendung

nicht geeignet sind. Nach Rücksprache mit den Herstellern sind die Resultate darauf rückzuführen, dass die Magnetoberfläche vollständig vom Haftkörper bedeckt wird. Diese Bauform sei zum Spannen von ringförmigen Kleinbauteilen ausgelegt.

Beim Vergleich der Testreihen 07 bzw. 08 wird zusätzlich die Erkenntnis gewonnen, dass eine unbearbeitete Oberfläche im Gegensatz zu einer gefrästen einen Haftkraftverlust von ca. 12% verursacht.

Nr.	Beschreibung	Mittelwert Zugkraft max. in N	Standardabw. Zugkraft max. in N	Theoretische Zugkraft max. in N	Verhältnis Praxis/Theorie
01	Stahlplatte rund / Seite 01	526	23,7	8.482	6,2%
02	Stahlplatte rund / Seite 02	620	15,2	8.482	7,3%
03	Schweißstisch; nicht entmagnetisiert	846	19,4	7.775	10,9%
04	Schweißstisch; entmagnetisiert	915	25,4	7.775	11,8%
05	Schweißstisch; Luftspalt 0.4 - 0.45mm	301	7,5	keine Angabe	
06	Stahlplatte 8mm	652	5,8	8.482	7,7%
07	Stahlplatte 40mm; gefräst	777	11,2	8.482	9,2%
08	Stahlplatte 40mm; unbearbeitet	686	5,8	8.482	8,1%
09	Stahlplatte 40mm; gefräst	753	6,4	8.482	8,9%

Tabelle 13: Messergebnisse Radialpolmagnet SCHUNK,
Quelle: Eigene Darstellung.

Quadratpoltechnik SCHUNK

Als Alternative zur Radialpoltechnik besteht die Möglichkeit Elektropermanentmagnete mit Quadratpoltechnik einzusetzen. Im Prinzip bestehen Sie aus einem Permanentmagnet der elektrisch ein- und ausgeschaltet wird. Hierbei wird Energie, in Form eines kurzzeitigen Stromimpulses, für die Umpolung benötigt. Die Magnetpolform ist quadratisch ausgeführt und schachbrettartig angeordnet. Die Magnete werden hauptsächlich zur 5-Seiten Fräsbearbeitung eingesetzt.

Für die Testversuche steht ein Magnet der Firma SCHUNK vom Typ Quadropol 50x50-25 zur Verfügung. Bei dieser Baugröße sind 25 Pole mit Abmessungen von 50x50mm je Pol in einem Quadrat angeordnet, was für den Einsatz in einer Säule zu groß ist. Deshalb werden zusätzlich Polverlängerungen verwendet, die je nach benötigter Polanzahl angeschraubt werden und den Magnetfluss weiterleiten. Anhand der Vorauslegung der Magnethaltkraft bringen 4 Pole die notwendige Kraft auf, weshalb in den folgenden Versuchsreihen 4 Polverlängerungen montiert werden. Des Weiteren wird als Haftkörper die gefräste 40mm Stahlplatte (S235JR) eingesetzt, da sie dem späteren Anwendungsfall am Nächsten kommt.

Zugversuch Quadratpolmagnet

Der Messaufbau und die Vorgehensweise zur Zugkraftermittlung entsprechen demselben wie beim Radialpolmagneten, mit dem Unterschied, dass zusätzlich die Auswirkungen von einem Luftspalt zwischen Magnet und Stahlplatte untersucht werden. Dies geschieht mit Abstandhaltern aus Aluminium, deren Bauhöhe über die Polverlängerungen hinausragt und auf denen der Haftkörper aufliegt (siehe Abbildung 19). Ein Luftspalt von 0,5mm ist deshalb notwendig, damit bei der Konzeptumsetzung das Vakuum von den Durchschaltventilen im Bo-

den an die Saugposition der Säulen gelangen kann. Vor jeder Testreihe wird mittels Fühlerlehrenband der Luftspalt kontrolliert.

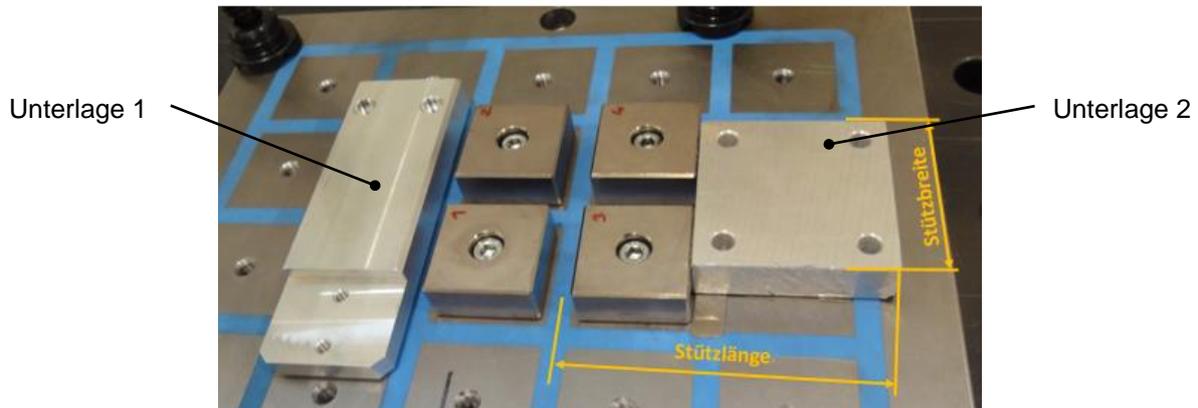


Abbildung 19: Aluminiumunterlagen zur Luftspalterzeugung, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Resultate des Zugversuchs zeigen, dass mit der Quadratpoltechnik die theoretischen Werte annähernd erreicht werden (siehe Tabelle 14). Die in Testreihe 03 ermittelte Zugkraft mit 4 Polen und einem Luftspalt von 0,5mm weicht um ca. 10% von der theoretisch berechneten Kraft ab. In der Berechnung wird der Haftkraftverlust durch die Polverlängerungen, mit dem vom Magnethersteller angegebenen Erfahrungswert von 15%, berücksichtigt.

Nr.	Beschreibung	Mittelwert Zugkraft max. in N	Standardabw. Zugkraft max. in N	Theoretische Zugkraft max. in N	Verhältnis Praxis/Theorie
01	2 Pole Stahlplatte 40mm; gefräst	4695	69,3	6.460	72,7%
02	4 Pole Stahlplatte 40mm; gefräst	10073	80,7	12.920	78,0%
03	4 Pole, 0,5mm, Stahlplatte 40mm; gefräst	4991	121,6	5.556	89,8%

Tabelle 14: Messergebnisse Zugversuch Quadratpolmagnet SCHUNK, Quelle: Eigene Darstellung.

Querkraftversuch Quadratpolmagnet

Nachdem mit den Zugversuchen die Haltekraft des Quadratpolmagneten bestätigt wurde, wird als nächstes das Verhalten bei Querkraftbelastungen ermittelt. Ziel ist es, den Einfluss von Stützlänge und Stützbreite der Säulenauflage auf die maximale Belastung zu eruieren. Unter der Stützlänge versteht man den Abstand zwischen Säulenmittelpunkt und dem äußersten Auflagepunkt an dem sich die Säule bei einer Querbelastung abstützt (siehe Abbildung 19). Für die Stützbreite wird die Unterlage 1 (115mm) bzw. Unterlage 2 (78mm) verwendet. Der Säulenkörper wird durch ein an der Stahlplatte fixiertes Aluminiumprofil ersetzt, an dem die Belastung in der Hebellänge zur Magnetfläche angreift (siehe Abbildung 20). Die Kraftaufbringung und -messung erfolgt wie beim Zugversuch über Gewindespindel und Kraftmessdose. Zusätzlich wird die zum Verschieben des Haftkörpers erforderliche Kraft (Verschiebekraft) parallel zur Aufspannfläche gemessen. Bei allen Testreihen beträgt der Luftspalt 0,5mm.

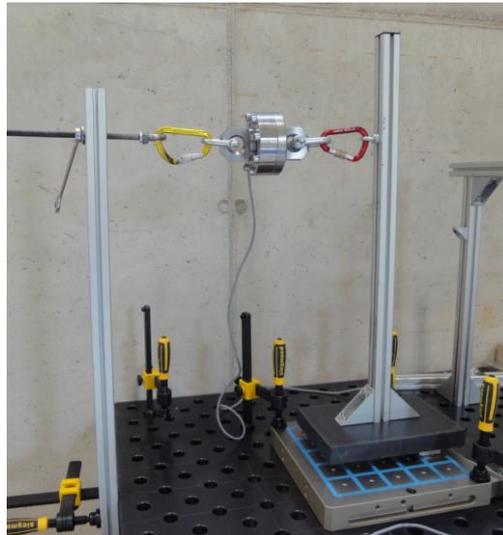


Abbildung 20: Messaufbau Querkraftversuch Quadratpolmagnet, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Messergebnisse zeigen, dass mit zunehmender Stützlänge sowie Stützbreite die Querkraft ansteigt (siehe Tabelle 15). Die Verschiebekraft entspricht mit 1000N ca. 20% der Magnethaltekraft. Dies bestätigt die von Magnetherstellern angegebenen Richtwerte von 15-30% der Halterkraft je nach Oberflächenqualität.

Nr.	Beschreibung	Mittelwert Querkraft max. in N	Stützlänge in mm	Hebellänge in mm	Rückrechnung Zugkraft in N
01	Unterlage 1	795	105	680	5145
02	Unterlage 1	1025	130	680	5359
03	Unterlage 1	1103	150	680	5000
04	Unterlage 2	852	130	680	4455
05	Unterlage 2	952	150	680	4316
06	Unterlage 2	820	150	780	4264
07	Unterlage 2 - verstärkte Profile	855	130	680	4472
08	Unterlage 2 - verstärkte Profile	776	130	800	4775
09	Unterlage 2 - verstärkte Profile - Aufbau 02	848	125	680	4613

Nr.	Kraftangriffspunkt	Mittelwert Verschiebekraft in N
01	130 mm	986
02	85 mm	1011

Tabelle 15: Messergebnisse Querkraftversuch Quadratpolmagnet SCHUNK, Quelle: Eigene Darstellung.

4.4.2 Vakuumventile - Schaltbereich Magnetventile

Nachdem die geeignete Magnettechnik gefunden wurde, wird im nächsten Schritt das Schaltverhalten der Magnetventile in Kombination mit der Quadratpoltechnik untersucht. Die Ventile des Herstellers SCHMALZ (Typ VCMV 3 25) eignen sich durch ihre kompakte Bauweise, mit Außendurchmesser 25mm und einer Bauhöhe von 3mm (siehe Abbildung 21). Das Kernelement der Konstruktion ist das Magnetplättchen, das für die Durchschaltung des Vakuums verantwortlich ist. Für den vom Hersteller vorgesehenen Anwendungsfall werden die Ventile durch einen ferromagnetischen Körper betätigt. Dies bedeutet, dass noch keine Aussage getätigt werden kann, wie ein eingeschalteter Quadratpolmagnet das Schaltverhalten beeinflusst.

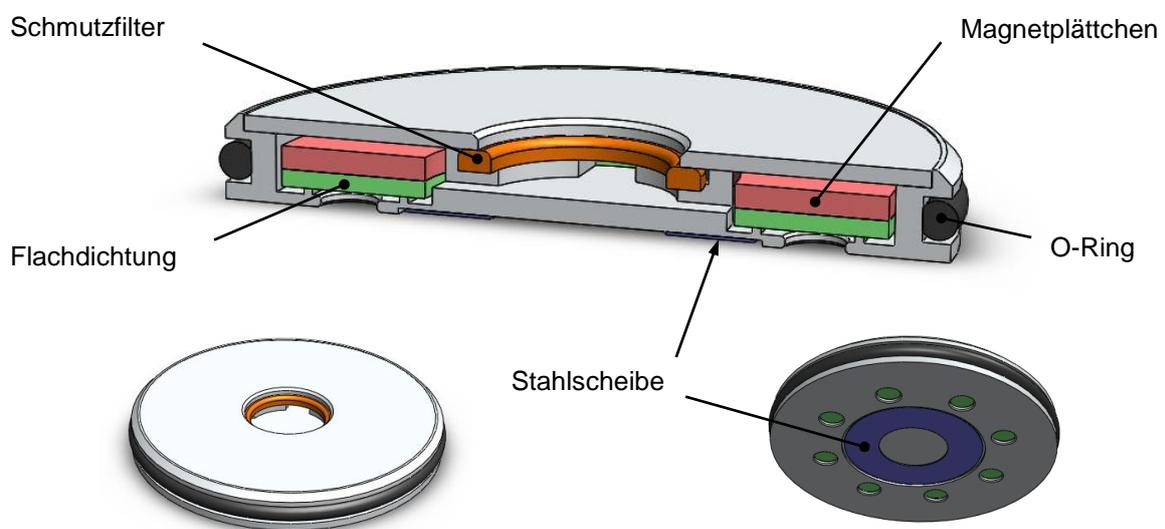


Abbildung 21: Aufbau Magnetventil,
Quelle: Eigene Darstellung.

Messaufbau

Für den Test werden die Ventile in eine 3mm dicke, ferromagnetische Stahlplatte eingebaut. Ein am Außendurchmesser montierter O-Ring verhindert Vakuumverluste zwischen Ventil und Stahlplatte. Damit die Ventile durch die Vakuumkraft nicht aus der Platte gezogen werden, dient eine abgedichtete und mit Klebeband befestigte Karoseriescheibe als Ventil Sitz (siehe Abbildung 22). Das Vakuum wird mit einer Vakuumpumpe erzeugt und der Schaltzustand der Ventile über ein Manometer kontrolliert. Der geschaltete Zustand zeigt sich durch einen Druckabfall.

Bei den Versuchen wird so vorgegangen, dass der Schaltzustand zusammen mit der Position am Magneten dokumentiert wird. Zusätzlich wird der Einfluss von unterschiedlichen Luftspalten ermittelt.

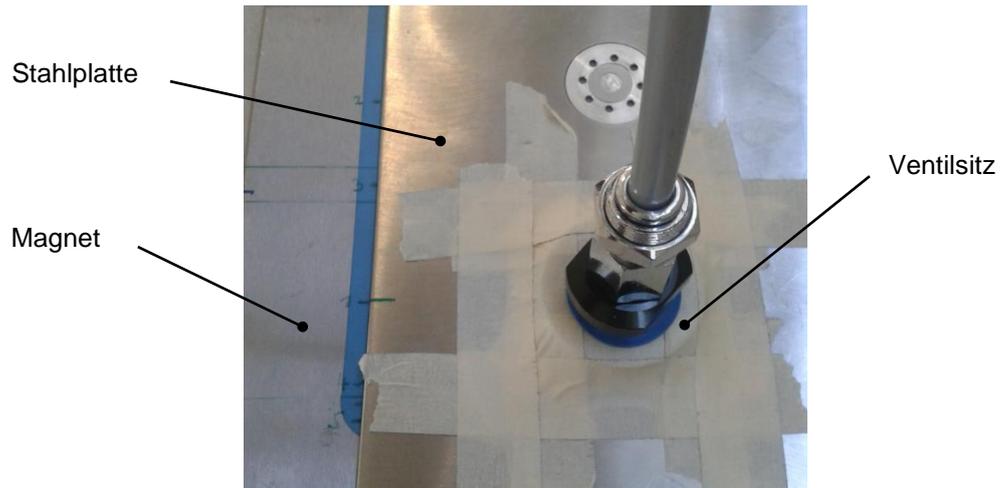


Abbildung 22: Versuchsaufbau Magnetventile,
Quelle: Eigene Darstellung.

Die wichtigste Erkenntnis ergibt sich aus der Schaltreihenfolge von Magnet und Vakuumpumpe. Wenn die Vakuumpumpe vor dem Magneten eingeschaltet wird, so bleibt das Ventil immer geschlossen, unabhängig davon, an welcher Position es sich befindet. Deshalb muss immer der Magnet vorher umgepolt werden, damit die Ventilfunktion ermöglicht wird. Wird bei geöffnetem Ventil und eingeschaltetem Vakuum der Magnet wieder entfernt, schließt sich das Ventil wieder.

Mit der gewonnenen Erkenntnis kann der in Abbildung 23 gelb dargestellte Schaltbereich festgestellt werden. Bei Verwendung von 4 Magnetpolen befindet sich der Bereich zwischen den einzelnen Polpaaren innerhalb von 20mm. Ab der Positionsnummer 5 reagiert das Ventil nicht mehr und bleibt geschlossen.

Die erzielten Ergebnisse beziehen sich auf einen Luftspaltabstand von 0,5mm und kleiner. Ab einem größeren Abstand funktionieren die Ventile nicht mehr zuverlässig.

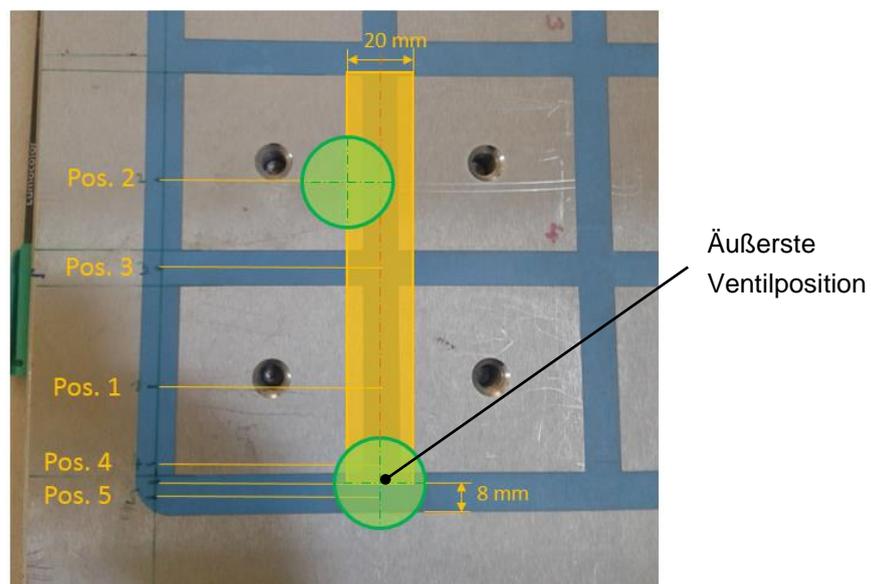


Abbildung 23: Schaltbereich von Magnetventil,
Quelle: Eigene Darstellung.

5 Konstruktion

Dieses Kapitel liefert einen Überblick der eingesetzten Komponenten für den konstruierten Prototypen, welcher auf Basis des gewählten Bausteinkonzeptes und den Vorabmessungen von Magneten und der Vakuumversorgung entwickelt wird. Im Zuge der Konstruktion werden wie bei der Konzeptabsicherung (siehe Kapitel 4.4) zur Auslegung der Komponenten Berechnungen sowie einfache Tests durchgeführt, anhand derer die theoretischen Kalkulationen gestützt werden sollen. Die folgenden Großbuchstaben beziehen sich auf den in Abbildung 24 veranschaulichten Konstruktionsüberblick.

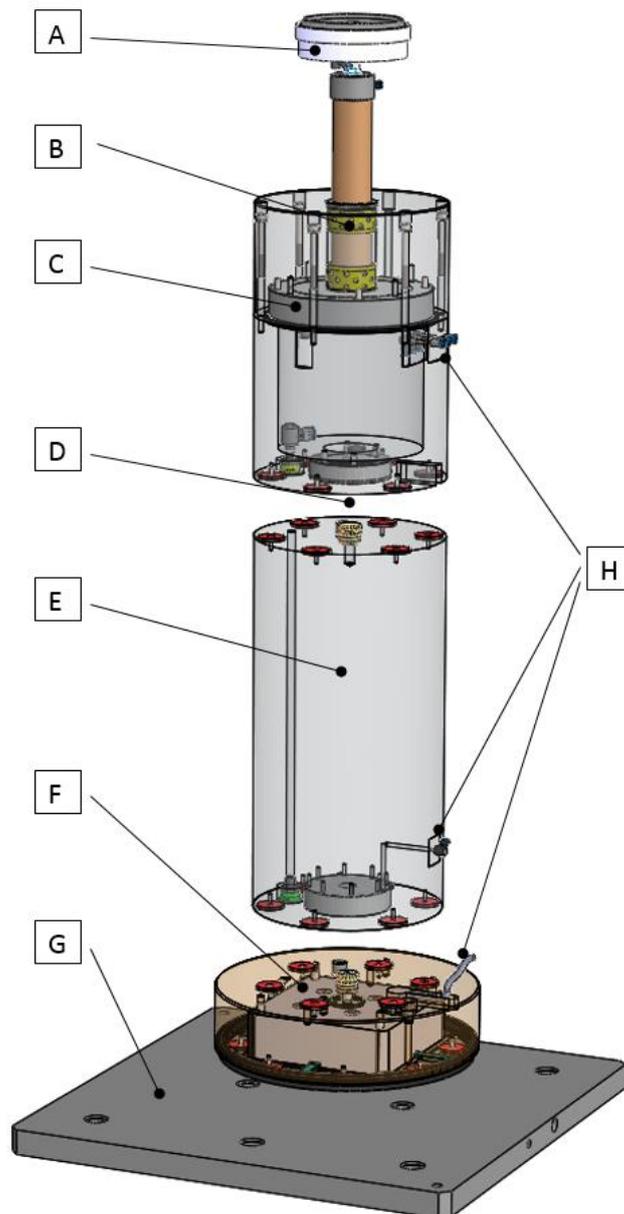


Abbildung 24: Konstruktionsüberblick Prototyp Bausteinsystem,
Quelle: Eigene Darstellung.

A Vakuumkopf

Hierfür wird ein firmenintern entwickelter und bereits im Einsatz befindlicher Vakuumkopf mit Kugelgelenk verwendet. Das Gelenk hat die Besonderheit, dass sich unabhängig von der Winkellage der Drehpunkt immer an dem zu spannenden Bauteil befindet. Dadurch werden durch Winkelfehler bedingte Abweichungen der Spannposition vermieden. Die Sauger sind in unterschiedlichen Baugrößen fertigbar. Für den Prototyp wird ein Durchmesser von 100mm gewählt.

B Säulenführung

Die Säulenführung hat die Aufgabe spielfrei eine horizontale Bewegung der Führungswelle zu ermöglichen. Spielfrei deshalb, da ansonsten über die Hebellänge die Kopfposition außerhalb der Toleranzgrenzen liegt. Als Führungselemente werden Gleitbuchsen eingesetzt die in die Aufnahmebohrung eingepresst werden. Es werden Rohlinge mit unterschiedlichen Passungen für die Gleitbuchsenaufnahmen gefertigt, um die optimale Passung für das geringste Welle/Buchsen-Spiel zu ermitteln. Die Messergebnisse von Kunststoffgleitbuchsen zeigen, dass die Buchse beim Einpressen ihre Rundheit verliert und somit keine zuverlässige Spielpassung garantiert werden kann.

Zufriedenstellende Resultate werden mit zwei axial fluchtenden Bronzegleitbuchsen mit Festschmierstoffeinlagerungen erzielt. Je weiter die Buchsen voneinander entfernt sind, desto geringer wirkt sich das Spiel auf die Kopfabweichung aus.

C Säulenklammer

Die Säulenklammer ist für die stufenlose Fixierung der Führungswelle zuständig und soll dies ohne Energiezufuhr ermöglichen. Deshalb wird ein pneumatisch lösbares Klemmelement verwendet, das sich durch eine geringe Bauhöhe und einfache Montage auszeichnet. Für den Prototypen ist eine nicht automatisierte Höhenverstellung vorgesehen.

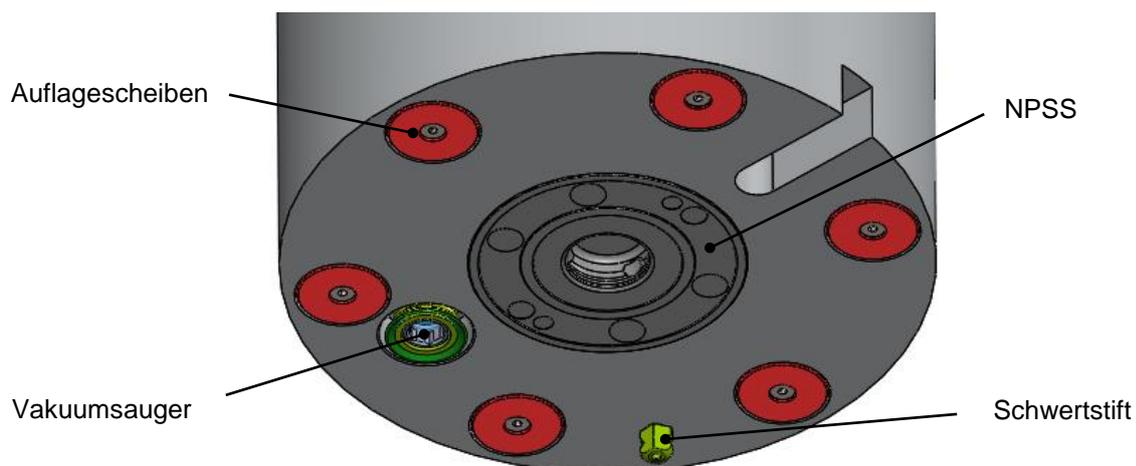


Abbildung 25: Unterseite Baustein variable Höhe,
Quelle: Eigene Darstellung.

D Bausteinverbindung

Diese Funktion wird von einem Nullpunktspannsystem (NPSS), das auf der Unterseite jedes Bausteins montiert wird, übernommen (siehe Abbildung 25). Neben den Vorteilen der kompakten Bauweise und der hohen Wiederholgenauigkeit werden bei diesen Komponenten die Bausteine über einen Konus am Spannzapfen zueinander angezogen. Der Zapfen wird auf der Oberseite der Bausteine befestigt. Die Aufnahmebohrungen für Spanntopf und Zapfen unterliegen engen Fertigungstoleranzen. Das eingesetzte Easy-Click-System der Firma STARK hebt sich von der Konkurrenz dadurch ab, dass Druckluft nur zum Lösen der Verbindung benötigt wird.

Damit die Bausteine gegen Verdrehen gesichert sind, wird ein Schwertstift, der auf der Gegenseite in eine Bohrungsbuchse eingreift, außermittig montiert. Kreisförmig angeordnete gehärtete Auflagescheiben dienen als Kontaktpunkte der Verbindung und sollen die Schmutzempfindlichkeit reduzieren. Des Weiteren kann durch unterlegen von Passscheiben der Abstand zwischen den Bausteinen und somit die Vorspannung durch das NPSS, nachjustiert werden. Die Vakuumübergabe wird über einen einfachen Vakuumsauger realisiert.

E Baustein fixe Höhe

Dieser Baustein sorgt, wenn benötigt, für die Grundhöhe einer jeden Säule und wird zwischen dem Magnetbaustein und dem Endbaustein eingesetzt. Er erfüllt die Schnittstellenfunktionen NPSS, Verdrehesicherung und Vakuumübergabe. Der restliche Aufbau ist in der Höhe beliebig skalierbar.

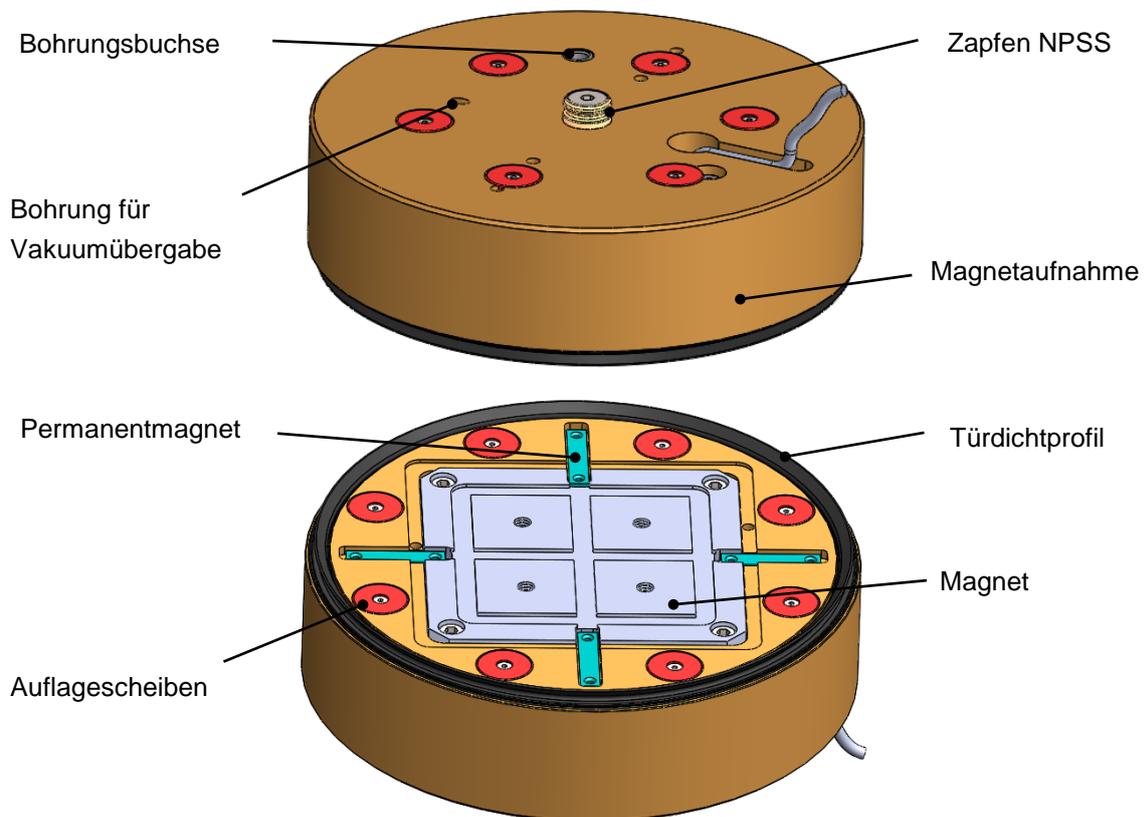


Abbildung 26: Baustein Magnet, Oberseite/Unterseite, Quelle: Eigene Darstellung.

F Baustein Magnet

Nach Auswertung der Versuche mit den Quadratpolmagneten und den Magnetventilen (siehe Kapitel 4.4) eignet sich der Magnetaufbau der Firma ASSFALG am besten für den Anwendungsfall. Im Unterschied zu dem Mustermagneten der Firma SCHUNK befinden sich zwischen den Magnetpolen, dem ermittelten Schaltbereich der Vakuumventile, Fräsnuten, die für den Vakuumtransport genutzt werden können. Dadurch wird kein Luftspalt mehr zwischen Magnet und Auflagefläche benötigt, wodurch die Magnethaltekraft erhöht wird. Diese Aussagen wurden anhand von Testreihen bestätigt.

Der Magnet selbst wird in einer Aufnahme aus Aluminium verschraubt (siehe Abbildung 26). An der Unterseite des Fertigungsteiles sind wiederum Ausfräsungen für gehärtete Auflage-scheiben und eine Nut zur Fixierung eines Türdichtprofils vorgesehen. Die robuste Dichtung hat die Aufgabe den Vakuumraum unterhalb der Säule von den äußeren Einflüssen abzuschotten. Die Breite der Dichtlippe muss größer als der Durchmesser der Magnetventilöffnung ausgelegt werden, damit bei ungünstiger Positionierung der Säule Vakuumleckagen vermieden werden können. Das Vakuum wird über eine Bohrung nach oben zur Übergabe-stelle geleitet. Über Permanentmagneten die radial entlang des Schaltbereichs montiert werden, können die Durchschaltventile auch außerhalb des Magneten betätigt werden.

G Säulenuntergrund

Der Säulenuntergrund dient einerseits als Auflagefläche für die Säulen und muss andererseits über die Durchschaltventile die Vakuumversorgung gewährleisten. Deshalb wird eine Anordnung der Ventile angestrebt, die mit geringstmöglicher Ventilanzahl jede Säulenposition mit Vakuum versorgen kann. Die geringste Anzahl erzielt man mit einer Rasteranordnung von gleichschenkeligen Dreiecken (siehe Abbildung 27). Beschränkt wird das Rastermaß durch den Außendurchmesser der Dichtlippe des Magnetbausteines.

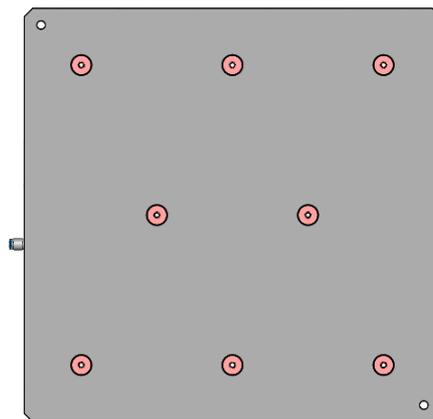


Abbildung 27: Rasteranordnung von Magnetventilen,
Quelle: Eigene Darstellung.

An der Unterseite des Säulenuntergrunds sind die Ventilpositionen über Fräsnuten miteinander verbunden und münden zentral in den Hauptvakuumanschluss (siehe Abbildung 28). Mit einem verschraubten Abdeckblech und einer Dichtschnur wird der Vakuumraum abgedichtet.

Somit entsteht ein sogenannter doppelter Boden der für die Vakuumversorgung zuständig ist. Dadurch, dass das Untergrundmaterial Einfluss auf die Magnethaltekraft hat, wird als Werkstoff für die Auflageplatte Vergütungsstahl C45U verwendet. Für den Prototypen genügen die Außenmaße von 500x500mm.

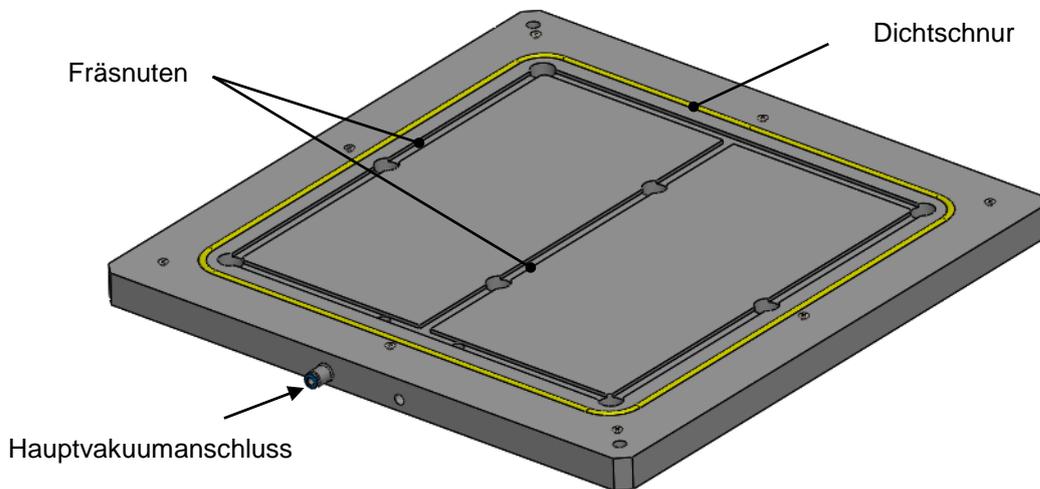


Abbildung 28: Unterseite Säulenuntergrund,
Quelle: Eigene Darstellung.

H Energieversorgungsschnittstellen

Der höhenverstellbare Baustein ist seitlich mit drei Anschlüssen versehen, mit denen NPSS, Klemmelement und Vakuumkopf mit Druckluft beaufschlagt werden können. Der Magnetbaustein besitzt einen fixen Kabelanschluss zur Umpolung des Magneten.

Anhand der beschriebenen Konstruktion des Prototypen werden für die Fertigungsbauteile Zeichnungsableitungen erstellt und Angebote bei den Lieferanten eingeholt. Die angeforderten Komponenten werden anschließend laut CAD-Modell zusammengebaut und in Betrieb genommen. Bei der Montage ist auf einen funktionsgerechten Einbau von Säulenklammer und NPSS zu achten.

6 Messungen

Anhand von vier unterschiedlichen Messungen werden die tatsächlichen Eigenschaften des entwickelten Prototypen erfasst und mit den zu Projektbeginn festgelegten Zielen und Rahmenbedingungen verglichen. Die Vorgehensweise der Versuche wird erläutert und in Schlussfolgerungen die Ergebnisse interpretiert. Folgende Untersuchungen werden durchgeführt:

- Führungsspielauswirkungen auf Vakuumkopf;
- Axialspiel von Klemmelement unter Axialbelastung (max. 1000N);
- Positionsabweichung von Vakuumkopf unter Querkraftbelastung (max. 500N);
- XY-Genauigkeit von Kopfposition (Wiederholgenauigkeit, etc.).

6.1 Messkomponenten

Je nach durchzuführender Messung werden verschiedene Komponenten benötigt, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Als Messuntergrund wird ein solider Schweißtisch aus Stahl verwendet. Dieser ist mit matrixangeordneten Bohrungen versehen, in denen Klemmen zur Fixierung von Bauteilen platziert werden können. Die Krafterzeugung erfolgt über eine Gewindespindel, die durch verdrehen der Mutter an den Profilaufbau angezogen wird. Der Profilaufbau besteht aus Aluminiumprofilen mit Verbindungselementen und hat die Aufgabe, die erzeugten Belastungen abzustützen und aufzunehmen. Zwischen Gewindespindel und Kraftangriffspunkt am Prototypen wird eine Kraftmessdose der Firma TEST GmbH eingebaut, anhand derer die Kraft überwacht werden kann. Der digitale Kraftaufnehmer von Typ 301 weist einen Messbereich von bis zu 50kN auf, bei einer relativen Kennwertabweichung von $\pm 0,1\%$. Über ein angeschlossenes Anzeigergerät (Typ 322 B) werden die aktuellen Messwerte dargestellt. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass nur der Spitzenwert angezeigt wird.

Zur Erfassung von Positionsabweichungen wird hauptsächlich der Messarm (Absolute Arm Typ 7525) der Firma ROMER eingesetzt. Bei einer volumetrischen Genauigkeit von $\pm 0,029\text{mm}$ kann mit dem Kugeltastkopf jede Position des Prototypen erfasst werden. Die Auswertung erfolgt über einen direkt angeschlossenen PC mit dazugehöriger Messsoftware. An leicht zugänglichen Messstellen wird als Alternative eine Messuhr mit einer Teilung von $0,01\text{mm}$ verwendet.

6.2 Führungsspielauswirkungen auf Vakuumkopf

Durch das toleranzbedingte Spiel zwischen Führungsbuchsen und Führungswelle werden die Auswirkungen auf die Positionsabweichung des Vakuumkopfes ohne Krafteinwirkung ermittelt. Dabei soll untersucht werden, welcher Unterschied zwischen geklemmter und ungeklemmter Führungswelle auftritt.

6.2.1 Vorgehensweise

Für den Messaufbau wird nur der obere Teil des variablen Bausteins mit Klemmelement, den Führungsbuchsen und der Führungswelle benötigt. Dieser wird über Klemmen mit dem Schweißstisch fest verbunden (siehe Abbildung 29). Die Führungswelle wird in die gewünschte Position verschoben, für die die Abweichung am Messpunkt ermittelt werden soll. Dieser befindet sich im Abstand H zum Bausteindeckel seitlich an der Vakuumkopfaufnahme und wird mittels Messuhr überwacht. Unter geringer Krafteinwirkung wird der Vakuumkopf in Messrichtung hin und her bewegt und der maximale Zeigerausschlag der Messuhr notiert. Der Vorgang wird in verschiedenen Höhen H mit geklemmter und ungeklemmter Führungswelle wiederholt.

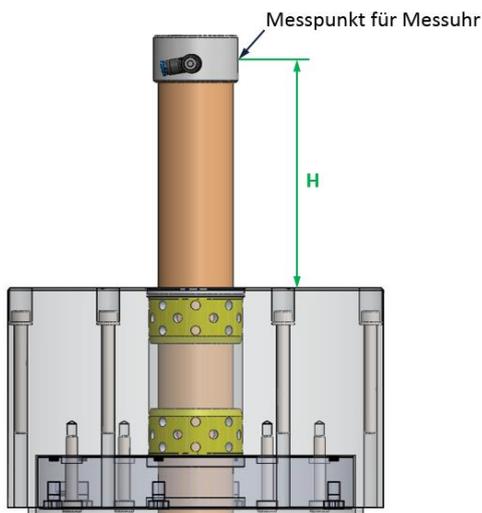


Abbildung 29: Messaufbau Führungsspielauswirkungen auf Vakuumkopf, Quelle: Eigene Darstellung.

6.2.2 Messergebnisse

Die Testreihe 3 laut Tabelle 16 zeigt, dass das gemessene Führungsspiel im ausgefahrenen Zustand der Führungswelle bereits ohne Klemmung innerhalb der vorgegebenen Toleranz von $\pm 0,15\text{mm}$ liegt. Die Abweichung ist über eine lose Kippbewegung der Welle spürbar. Durch das Klemmelement entfällt diese Bewegung und das Führungsspiel wird um mindestens 40% verringert. Eine zusätzliche Spielreduzierung kann durch Erhöhung des Abstands zwischen den Führungsbuchsen realisiert werden.

Nr.	Abstand Messpunkt zu Bausteindeckel H in mm	Abweichung ohne Klemmung in mm	Abweichung mit Klemmung in mm
1	128,5	0,18 (+/- 0,09)	0,10 (+/- 0,05)
2	152	0,19 (+/- 0,095)	-
3	195	0,24 (+/- 0,12)	0,15 (+/- 0,075)

Tabelle 16: Messergebnisse Führungsspielauswirkung auf Vakuumkopf,
Quelle: Eigene Darstellung.

6.3 Axialspiel Klemmelement

Durch eine am Vakuumkopf eingeleitete Axialkraft von maximal 1000N wird die Nachgiebigkeit des Klemmelements, des Nullpunktspannsystems, sowie des Magnetbausteins unter Last ermittelt. Die Verformungen dürfen dabei nicht mehr als 0,2mm vom unbelasteten Zustand abweichen.

6.3.1 Vorgehensweise

Die Auflageplatte zur Vakuumversorgung wird mit Klemmen am Schweißstisch befestigt. Der Magnetbaustein inklusive dem mit dem NPSS verbundenen Säulenbaustein wird auf der Platte platziert und eingeschalten. Durch Versorgung des Klemmelements mit Druckluft wird die Führungswelle in die gewünschte Endposition gebracht. Als Referenzmaß für die Hubhöhe dient der Abstand h_1 zwischen der Oberseite des Säulengrundkörpers und der Aufnahme für den Vakuumkopf (siehe Abbildung 30). Die Zugkraft wird über die am Profilaufbau befestigten Gewindespindel erzeugt und mit der Kraftmessdose überwacht. Die Krafteinleitung erfolgt über einen in der Vakuumkopfaufnahme verschraubten Lashaken. Anschließend werden mit dem Messarm die definierten Messpunkte im unbelasteten Zustand vermessen und als Referenzpunkte herangezogen. Dabei soll jeder Messpunkt die Nachgiebigkeit in Belastungsrichtung von einem bestimmten Bauteil überwachen (siehe Abbildung 30).

- Messpunkt 1: Klemmelement;
- Messpunkt 2: Nullpunktspannsystem;
- Messpunkt 3: Magnetbaustein;
- Messpunkt 4: Auflageplatte.

Die Kraft wird in Schritten zu je 250N aufgebracht und die Abweichungen mit dem Messarm dokumentiert.

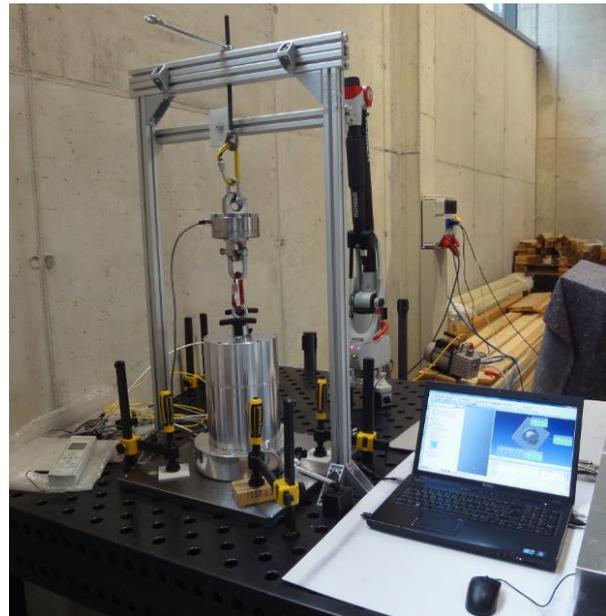
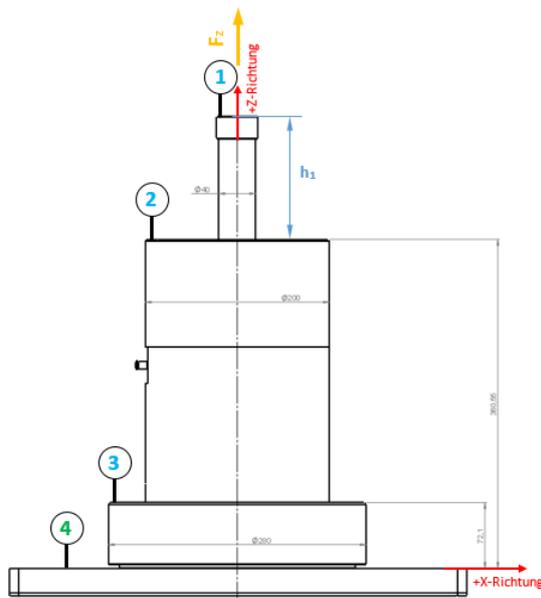


Abbildung 30: Messaufbau Axialspiel Klemmelement,
Quelle: Eigene Darstellung.

6.3.2 Messergebnisse

Im eingefahrenen Zustand der Führungswelle bestätigt die Messung der Testreihen 1-4, dass die Auflageplatte, der Magnetbaustein und das Klemmelement bei maximaler Belastung in Zugrichtung ihre Ausgangsposition beibehalten (siehe Tabelle 17). Einzig das NPSS gibt ab einer Zugkraft von ca. 1000N um 0,01mm nach. Nahezu idente Ergebnisse werden mit maximaler Säulenhöhe in den Testreihen 5-7 erreicht. Bis auf das Verhalten des Klemmelements konnten keine Unterschiede festgestellt werden. Ab einer Axialbelastung von ca. 750 N weicht dieses um 0,01mm von seiner Ausgangslage ab. Daraus resultiert, dass der Säulenaufbau unter den geforderten axialen Belastungen innerhalb der Toleranzgrenze von +/- 0,2mm liegt und die Komponenten ausreichend dimensioniert sind.

Nr.	Zugkraft F_z in N	Hub h_1 in mm	Messpunkt 1 Z-Achse in mm	Messpunkt 2 Z-Achse in mm	Messpunkt 3 Z-Achse in mm	Messpunkt 4 Z-Achse in mm
1	249	30	0	0	0	0
2	504	30	0	0	0	0
3	756	30	0	0	0	0
4	1005	30	0,01	0,01	0	0
5	504	135	0	0	0	0
6	752	135	0,01	0	0	0
7	1004	135	0,02	0,01	0	0

Tabelle 17: Messergebnisse Axialspiel Klemmelement,
Quelle: Eigene Darstellung.

6.4 Positionsabweichung durch Querkraftbelastung

Durch eine am Vakuumkopf eingeleitete Querkraft von maximal 500N wird die Positionsabweichung des Kopfes unter Last ermittelt. Die Verformungen dürfen dabei nicht mehr als 0,2mm vom unbelasteten Zustand abweichen.

6.4.1 Vorgehensweise

Der Messaufbau entspricht dem zuvor beschriebenen Zugversuch (siehe Kapitel 6.3.1) mit dem Unterschied, dass die Krafrichtung quer zur Säulenachse liegt. Dementsprechend wird die Gewindespindel mit der Kraftmessdose an einem Seitenprofil abgestützt, wie in Abbildung 31 rechts dargestellt. Die Versuche werden im ausgefahrenen Zustand der Führungswelle durchgeführt, da dieser den Extremfall der Konstruktionsbelastung wiedergibt. Die Vermessung von Messpunkt 1 gibt Aufschluss über den Versatz der Kopfposition in X-Richtung, je nach Höhe der Querkraft (100N Schritte). Die restlichen Messpunkte sind ident mit den Punkten vom Zugversuch.

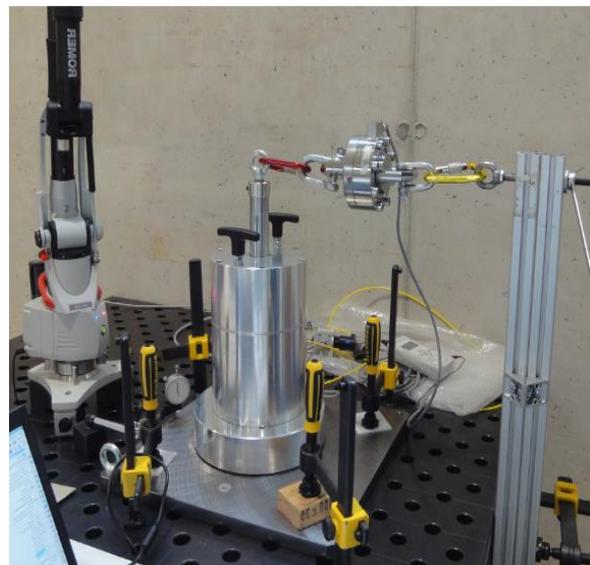
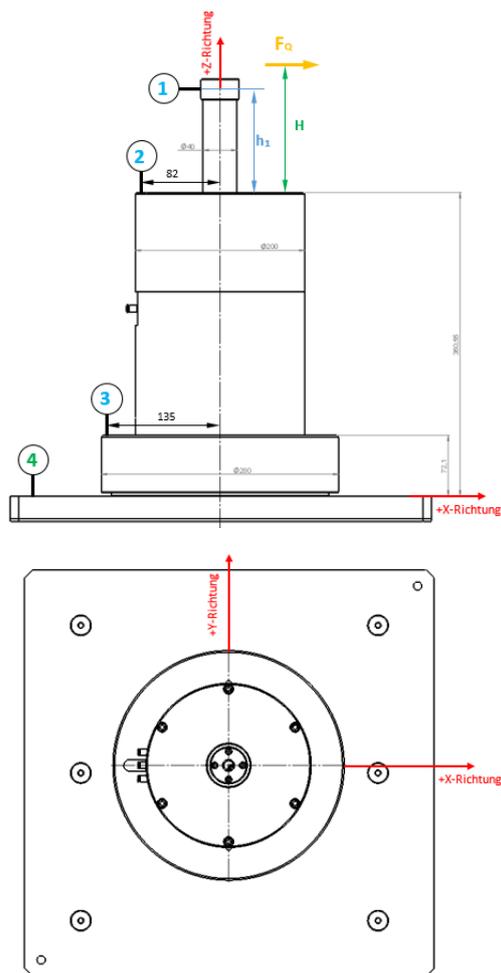


Abbildung 31: Messaufbau Positionsabweichung durch Querkraftbelastung, Quelle: Eigene Darstellung.

6.4.2 Messergebnisse

Anhand der in Tabelle 18 dargestellten Messergebnisse kann darauf zurückgeschlossen werden, dass die mit dem Schweißstisch verbundenen Auflageplatte (Messpunkt 4) und der Magnetbaustein (Messpunkt 3) keinen Einfluss auf die Positionsverschiebung des Vakuumpkopfes durch eine Querkraftbelastung haben. Die Überwachung von Messpunkt 2 zeigt, dass das NPSS durch die Belastung im hinteren Bereich angehoben wird. Mithilfe von einem Fühlerlehrenband, das zwischen Säulenkörper und Magnetbaustein geschoben wird, wird dieses Verhalten bestätigt. Dadurch werden die bereits in Kapitel 6.2 ermittelten Führungsspielauswirkungen auf den Vakuumpkopf zusätzlich verstärkt, weshalb ab einer Querkraft von 200N die geforderte Genauigkeit von +/- 0,2mm schon überschritten wird. Eine radiale Positionsverschiebung von 0,39mm bei maximaler Belastung von 500N kann nicht akzeptiert werden. Nach Rücksprache mit dem Lieferanten des NPSS sind die Resultate darauf zurückzuführen, dass mit den Auflagescheiben zwischen den Bausteinen fertigungsbedingt keine ebene Auflagefläche erzeugt wird und somit nur teilweiser Kontakt besteht. Deshalb wird empfohlen, die Auflagescheiben zu entfernen und eine ringförmige Auflagefläche im Außenbereich der Schnittstelle zu fertigen.

Nr.	Querkraft F_Q in N	Hub h_1 / H in mm	Messpunkt 1 X-Achse in mm	Messpunkt2 Z-Achse in mm	Messpunkt 3 Z-Achse in mm	Messpunkt 4 Z-Achse in mm
1	201	135/172	+0,2	+0,03	0	0
2	300	135/172	+0,26	+0,04	0	0
3	400	135/172	+0,33	+0,06	0	0
4	500	135/172	+0,39	+0,07	0	0

Tabelle 18: Messergebnisse Positionsabweichungen durch Querkraftbelastung,
Quelle: Eigene Darstellung.

6.5 XY-Genauigkeit von Kopfposition

Durch die Vermessung der Mittelpunkte von Magnetbaustein und Vakuumpkopf werden die XY-Koordinaten ermittelt und miteinander verglichen. Dadurch soll eruiert werden, wie sich die Fertigungstoleranzen von dem Prototypen auf die Kopfposition auswirken, in Abhängigkeit von Säulenhub und Position der Säule auf der Auflagefläche.

6.5.1 Vorgehensweise

In Anlehnung an die Ermittlung des Axialspiels von dem Klemmelement (siehe Kapitel 6.3.1) wird die Auflageplatte mit Klemmen an den Schweißstisch befestigt. Der Magnetbaustein wird an einer beliebigen Position 1 auf der Platte platziert und umgepolt. Mit dem Messarm wird der Mittelpunkt des NPSS-Zapfens vermessen, welcher in weiterer Folge als Referenzpunkt (siehe Abbildung 32, Messpunkt 1) herangezogen wird. Anschließend wird der Säulenbau-

stein auf den Magnetbaustein aufgesetzt und die Führungswelle in der gewünschten Höhe h_1 fixiert. Die Achsposition in der XY-Ebene von der Vakuumkopfaufnahme wird mit dem Messarm erfasst (Messpunkt 2) und mit dem zuvor ermittelten Referenzpunkt verglichen. Dieser Vorgang wird mit unterschiedlichen Säulenhöhen und Positionen auf der Auflageplatte wiederholt und dokumentiert. Die verschiedenen Positionen 1 bis 3 in Tabelle 19 bedeuten, dass der Prototyp in XY-Richtung verschoben, sowie um seine Mittenachse verdreht wurde.

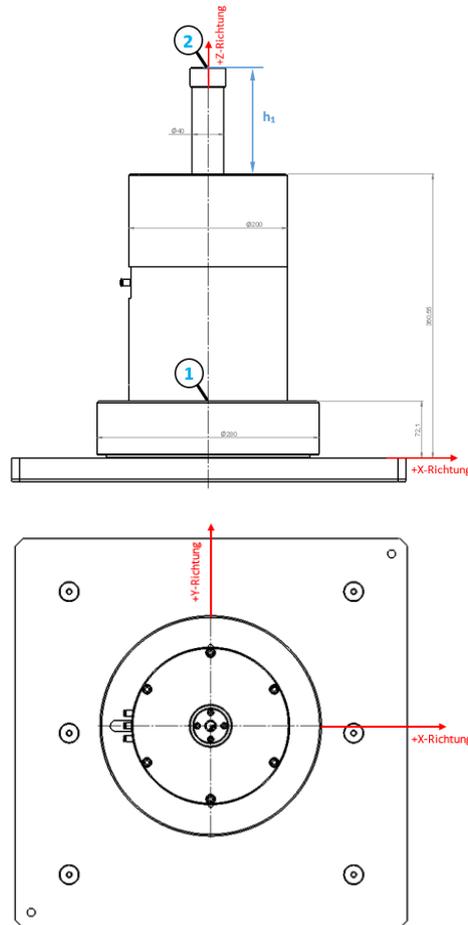


Abbildung 32: Messaufbau XY-Genauigkeit von Kopfposition,
Quelle: Eigene Darstellung.

6.5.2 Messergebnisse

Grundsätzlich liegen alle Messwerte des Vakuumkopfs innerhalb von $\pm 0,1\text{mm}$, bezogen auf den Referenzpunkt des Magnetbausteins. Durch das Ein- und Ausfahren der Führungswelle verändert sich die Position um maximal $0,06\text{mm}$ in X-Richtung und $0,05\text{mm}$ in Y-Richtung. Eine neue Positionierung der Säule ergibt eine Wiederholgenauigkeit von $\pm 0,02\text{mm}$. Die Ergebnisse können darauf zurückgeführt werden, dass die Fertigungstoleranzen sowohl im Bereich der Bausteinschnittstelle, als auch bei der Säulenführung Einfluss auf die Position des Vakuumkopfes haben und nicht zu vernachlässigen sind. Bereits geringe Abweichungen im unteren Säulenaufbau verursachen über die Hebellänge des Grundkörpers erhebliche Fehler und sollen so gut wie möglich kompensiert werden.

Nr.	Hub h_1 in mm	Messpunkt 2 X-Achse in mm	Messpunkt 2 Y-Achse in mm	Bemerkung
1	30	0	+0,04	Position 1 eingefahren
2	135	-0,06	+0,09	Position 1 ausgefahren
3	30	-0,01	+0,04	Wiederholung Position 1 eingefahren
4	135	-0,07	+0,07	Wiederholung Position 1 ausgefahren
5	30	-0,01	+0,03	Position 2 eingefahren
6	135	-0,06	+0,05	Position 2 ausgefahren
7	135	-0,06	+0,07	Position 3 ausgefahren

Tabelle 19: Messergebnisse XY-Genauigkeit von Kopfposition,
Quelle: Eigene Darstellung.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Erkenntnisse aus der Patent- und Produktrecherche die richtungsweisenden Ideen für den Konzeptfindungsprozess aufgezeigt haben. Beide Recherchemethoden ergänzen sich gegenseitig und ergeben eine Fülle an Informationen, die mithilfe von Bewertungsmethoden strukturiert verarbeitet werden. Durch Ausschlussverfahren, wie dem Paarvergleich, werden die zielführendsten Lösungsansätze herausgefiltert, was schlussendlich zu einem frei positionierbaren Säulenkonzept führt. Dies wird mit einem Magnetspannelement in Kombination mit Vakuumventilen in der Auflagefläche realisiert. Anhand von Vorabmessungen der Magnethaltekraft und dem Durchschaltverhalten der Ventile wird die geeignete Magnettechnologie ermittelt und ihr Einfluss auf die Vakuumventile untersucht. Die Resultate zeigen, dass die Quadratpoltechnik hohe Haltekräfte erzeugt und die Ventile zwischen den Polpaaren zuverlässig das Vakuum weiterleiten.

Für den Säulengrundkörper wird aufgrund der geforderten Hubhöhe von 500mm das Bausteinsystem eingesetzt, wodurch die Gesamtbauhöhe gering gehalten wird. Die Bauweise ermöglicht zudem den Einsatz von verschiedenen Kopfvarianten, bei gleichbleibenden Grundkörper, wodurch die Flexibilität bei Bauteiländerungen erhöht wird.

Die Einhaltung der definierten Ziele und Rahmenbedingungen werden mit Messungen an dem gefertigten Prototyp kontrolliert. Die Befürchtung, dass das pneumatische Klemmelement bei axialer Belastung nachgibt, kann widerlegt werden. Das Spiel zwischen Gleitbuchse und Führungswelle muss gering gehalten werden, da es über die Hublänge Auswirkungen auf die Position des Vakuumkopfes hat. Zudem beeinflussen die Fertigungstoleranzen der Auflagescheiben im Bereich des Magnetbausteines die Vakuumkopfposition. Diese führen bei Querkraftbelastungen zu einer unakzeptablen Überschreitung der Maximalwerte. Daraus resultiert, dass konstruktive Gegenmaßnahmen getroffen werden müssen, damit die geforderten Spannvorrichtungstoleranzen eingehalten werden.

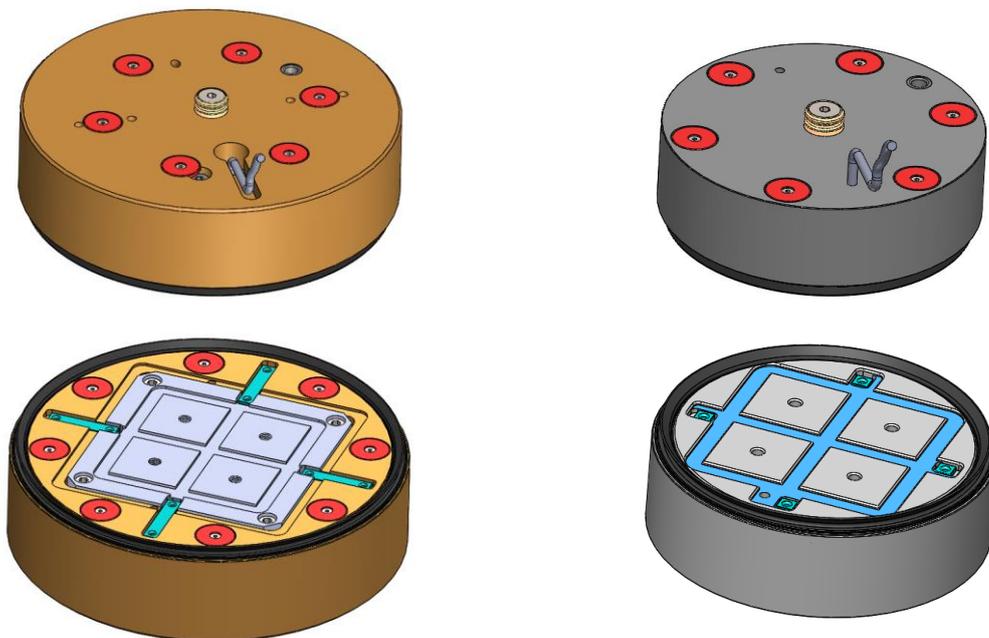


Abbildung 33: Gegenüberstellung der Magnetbausteinvarianten,
Quelle: Eigene Darstellung.

Konstruktives Verbesserungspotential besteht beispielsweise für den Magnetbaustein. Eine sogenannte „All-in-One“ Variante integriert den Magnetaufnahmetopf und den Magneten in einem Bauteil, wie in Abbildung 33 dargestellt. Rücksprachen mit den Magnethersteller bestätigen die Umsetzbarkeit. Durch den Aufbau können sowohl die Außenabmessungen als auch die Kosten verringert werden.

Mit dieser Arbeit wurde die Basis für eine universelle Vakuumspannvorrichtung geschaffen, die nicht nur in der Luftfahrtindustrie eingesetzt werden kann. Die Vakuumversorgung der Säuleneinheiten über die Auflagefläche ermöglicht einen kompakten Säulengrundkörper und verlagert die notwendige Intelligenz zur automatisierten Positionierung in die Handlingmaschine. Mit den gewonnenen Informationen des entwickelten Säulenprototyps besteht für die Firma MICADO die Möglichkeit sich in weiterer Folge mit dem Anlagenkonzept auseinanderzusetzen. Dieses fordert einen hohen Automatisierungsgrad und muss bezüglich Kosten, Genauigkeit und Sicherheit untersucht werden. Ein firmeninterner Kalkulator kann entwickelt werden, welcher anhand der Kundenvorgaben die Anlagenkosten bzw. Säulenanforderungen ermittelt. Mögliche Kundenvorgaben können sein:

- Bauteilanzahl;
- Bauteilgrößen / -dicken;
- Bauteilwerkstoff;
- Bearbeitungsverfahren (z.B. Trocken-, Nassbearbeitung, Bohren, Fräsen, etc.);
- Fertigungsgenauigkeit;
- Anlageneinsatz (Prototypenbau, Serienfertigung, etc.);
- Bearbeitungskräfte.

Literaturverzeichnis

Belli, Marco; Bindelli, Filippo (2014): Einheit zur Positionierung von Platten aus Glas, Marmor, Stein, Holz, Holzderivate oder dergleichen auf der Arbeitsplatte einer Maschine zur Bearbeitung dieser Platten und Maschine mit dieser Einheit, Biesse S.p.A., Schutzrecht EP 2 682 226 B1

Lorincz, Jim (2012): *Shops Grow with Latest Technology*, in: Manufacturing Engineering, Heft 3/2012, S. 91-101

Perović, Božina (2013): *Vorrichtungen im Werkzeugmaschinenbau: Grundlagen, Berechnung und Konstruktion*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

Ross, Richard; Gannon, Georg (1994): Universal holding fixture end effector, The Boeing Company, Schutzrecht US 5364083 A

Schwock, Stefan (2010): *Flexibles Vorrichtungssystem*, in: Braun, Steffen; Maier, Walther; Zirkelbach, Simone: *Intelligent produzieren: Liber amicorum*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, S. 269-274

Offenburger, Oliver (2014): *Patent und Patentrecherche: Praxisbuch für KMU, Start-ups und Erfinder*, Springer Fachmedien, Wiesbaden

Park, Changbyung u.a. (2015): *Innovative 5-m-off-distance inductive power transfer systems with optimally shaped dipole coils*, in: IEEE Transactions on Power Electronics, Volume 30/2, S. 817-827

Schawel, Christian; Billing, Fabian (2012): *Top 100 Management Tools: Das wichtigste Buch eines Managers*, 4. Auflage, Gabler Verlage | Springer Fachmedien, Wiesbaden

Witte (2009): Vakuumfuß, Horst Witte Gerätebau Barskamp KG, Schutzrecht DE 20 2009 006 437 U1

Zimmer, Günther; Zimmer, Martin; Sturm, Gotthilf (2010): Vorgesteuertes Ventil mit einem umschlossenen, magnetischen oder magnetisierbaren Ventilkörper, Zimmer GmbH Technische Werkstätten, Schutzrecht EP 1 814 697 B1

Onlinequellen

Assfalg GmbH (2014): *Spann- und Hebemagnete*

<http://www.assfalg-gmbh.de/units/2> [Stand 02.02.2016]

Balluff GmbH (2016): *Induktive Koppler*

<http://www.balluff.com/balluff/MAT/de/produkte/Uebersicht-Induktive-Koppler.jsp> [Stand 02.02.2016]

Europäische Patentorganisation (o.J.): *Erweiterte Suche*

<http://worldwide.espacenet.com/advancedSearch> [Stand 02.02.2016]

Horst Witte Gerätebau Barskamp KG (2016): *Vakuumsparntechnik*

<https://www.horst-witte.de/> [Stand 02.02.2016]

J. Schmalz GmbH (2016): *Vakuumpkomponenten, Vakuumaufspannsysteme*

<http://de.schmalz.com/produkte/> [Stand 02.02.2016]

Micado Smart Engineering GmbH (2016): *Aerospace*

<http://www.micado.at/de/icon-aerospace-de.html> [Stand 02.02.2016]

SAV Spann- Automations- Normteiletechnik GmbH (2014): *Magnetspanntechnik*

http://www.sav-spanntechnik.com/pdf/kataloge/SAV-Magnetspanntechnik_K1D_V2014-01.pdf [Stand 02.02.2016]

SCHUNK GmbH & Co. KG (2016): *Nullpunktspannsystem*

<http://www.schunk-vero-s.de/de/inhalt/startseite.html> [Stand 02.02.2016]

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Befräsen des Überstands von CFK-Bauteil, Quelle: Micado (2016), Onlinequelle [02.02.2016].....	1
Abbildung 2: Konventionelle Vakuumspannvorrichtung / Hard Tool, Quelle: Micado (2016), Onlinequelle [02.02.2016].....	2
Abbildung 3: universelle Vakuumspannvorrichtung, Quelle: Micado (2016), Onlinequelle [02.02.2016].	2
Abbildung 4: Kernaufgabengebiete der Entwicklung, Quelle: Eigene Darstellung.....	4
Abbildung 5: Universelle Spannvorrichtung mit fixen Raster, Quelle: Lorincz (2012), S. 96..	6
Abbildung 6: Ankopplung der Werkzeugmaschinen an das passive UHF-Element, Quelle: Schwock (2010), S. 272.	7
Abbildung 7: Beispielbilder zu Themengebieten der Patentrechercheergebnisse, Quelle: Europäische Patentorganisation (o.J.), Onlinequelle [02.02.2016].....	10
Abbildung 8: Produktrecherche von Magnetspannelementen; Radialpolmagnet (links), Quadratpolmagnet (mitte), Hebemagnet (rechts), Quelle: Assfalg GmbH (2014), Onlinequelle [02.02.2016].	13
Abbildung 9: Produktrecherche von Vakuumspannelementen, Vakuumfuß (links), Rasterspannplatten (rechts), Quelle: Horst Witte Gerätebau Barskamp KG (2016), Onlinequelle [02.02.2016].....	14
Abbildung 10: Produktrecherche von mechanischen Schnellspannelementen, Nullpunktspannsystem (links), Schnellspanner (rechts), Quelle: SCHUNK GmbH & Co. KG (2016), Onlinequelle [02.02.2016].....	14
Abbildung 11: Produktrecherche zur Vakuumversorgung; Vakuumpumpe (links), Strömungsventil (mitte), magnetische Durchschaltventile (rechts), Quelle: J. Schmalz GmbH (2016), Onlinequelle [02.02.2016].....	16
Abbildung 12: Produktrecherche zur Kommunikation; Schnellwechselsysteme, Quelle: SCHUNK GmbH & Co. KG (2016), Onlinequelle [02.02.2016].....	17
Abbildung 13: Konzept passive Säule: Teleskopschiene, Quelle: Eigene Darstellung.	23
Abbildung 14: Konzept passive Säule: Rundführung - Klemmung hydraulisch, Quelle: Eigene Darstellung.....	25
Abbildung 15: Konzept passive Säule: Rundführung - Klemmung pneumatisch, Quelle: Eigene Darstellung.	26
Abbildung 16: Konzept Bausteinsystem: Aufbau, Quelle: Eigene Darstellung.	27
Abbildung 17: Freigemachte Säule durch Querkraftbelastung, Quelle: Eigene Darstellung. .	31
Abbildung 18: Messaufbau Radialpolmagnet inkl. Haftkörper, Quelle: Eigene Darstellung. ...	32

Abbildung 19: Aluminiumunterlagen zur Luftspalterzeugung, Quelle: Eigene Darstellung. ...	34
Abbildung 20: Messaufbau Querkraftversuch Quadratpolmagnet, Quelle: Eigene Darstellung.	35
Abbildung 21: Aufbau Magnetventil, Quelle: Eigene Darstellung.	36
Abbildung 22: Versuchsaufbau Magnetventile, Quelle: Eigene Darstellung.	37
Abbildung 23: Schaltbereich von Magnetventil, Quelle: Eigene Darstellung.	37
Abbildung 24: Konstruktionsüberblick Prototyp Bausteinsystem, Quelle: Eigene Darstellung.	38
Abbildung 25: Unterseite Baustein variable Höhe, Quelle: Eigene Darstellung.	39
Abbildung 26: Baustein Magnet, Oberseite/Unterseite, Quelle: Eigene Darstellung.....	40
Abbildung 27: Rasteranordnung von Magnetventilen, Quelle: Eigene Darstellung.....	41
Abbildung 28: Unterseite Säulenuntergrund, Quelle: Eigene Darstellung.	42
Abbildung 29: Messaufbau Führungsspielauswirkungen auf Vakuumkopf, Quelle: Eigene Darstellung.	44
Abbildung 30: Messaufbau Axialspiel Klemmelement, Quelle: Eigene Darstellung.....	46
Abbildung 31: Messaufbau Positionsabweichung durch Querkraftbelastung, Quelle: Eigene Darstellung.	47
Abbildung 32: Messaufbau XY-Genauigkeit von Kopfposition, Quelle: Eigene Darstellung. .	49
Abbildung 33: Gegenüberstellung der Magnetbausteinvarianten, Quelle: Eigene Darstellung.	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispiel für die Dokumentation der Patentrechercheergebnisse, Quelle: Ross/Gannon (1994), Schutzrecht US 5364083 A, S. 1.	9
Tabelle 2: Endergebnis morphologischer Kasten, Quelle: Eigene Darstellung.....	20
Tabelle 3: Beispiel für Paarvergleich, Quelle: Eigene Darstellung.	21
Tabelle 4: Morphologischer Kasten nach dem Auswahlverfahren, Quelle: Eigene Darstellung.	22
Tabelle 5: Konzept Teleskopschiene: Benötigte Komponenten, Quelle: Eigene Darstellung.	24
Tabelle 6: Konzept Teleskopschiene: Argumentenbilanz, Quelle: Eigene Darstellung.....	24
Tabelle 7: Konzept Rundführung - Klemmung hydraulisch: Benötigte Komponenten, Quelle: Eigene Darstellung.	25
Tabelle 8: Konzept Rundführung - Klemmung hydraulisch: Argumentenbilanz, Quelle: Eigene Darstellung.	25
Tabelle 9: Konzept Rundführung - Klemmung pneumatisch: Benötigte Komponenten, Quelle: Eigene Darstellung.	26
Tabelle 10: Konzept Rundführung - Klemmung pneumatisch: Argumentenbilanz, Quelle: Eigene Darstellung.	26
Tabelle 11: Konzept Bausteinsystem: Benötigte Komponenten, Quelle: Eigene Darstellung.	28
Tabelle 12: Konzept Bausteinsystem: Argumentenbilanz, Quelle: Eigene Darstellung.	28
Tabelle 13: Messergebnisse Radialpolmagnet SCHUNK, Quelle: Eigene Darstellung.....	33
Tabelle 14: Messergebnisse Zugversuch Quadratpolmagnet SCHUNK, Quelle: Eigene Darstellung.....	34
Tabelle 15: Messergebnisse Querkraftversuch Quadratpolmagnet SCHUNK, Quelle: Eigene Darstellung.....	35
Tabelle 16: Messergebnisse Führungsspielauswirkung auf Vakuumkopf, Quelle: Eigene Darstellung.....	45
Tabelle 17: Messergebnisse Axialspiel Klemmelement, Quelle: Eigene Darstellung.	46
Tabelle 18: Messergebnisse Positionsabweichungen durch Querkraftbelastung, Quelle: Eigene Darstellung.	48
Tabelle 19: Messergebnisse XY-Genauigkeit von Kopfposition, Quelle: Eigene Darstellung.	50