

Bachelorarbeit

Jurij Kaiser

Entwicklung und Konstruktion einer Laser- Ablenkeinheit basierend auf der klassischen Zwei-Spiegel-Konstruktion

*Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Automotive and
Aeronautical Engineering*

Jurij Kaiser

**Entwicklung und Konstruktion einer Laser-Ablenkeinheit
basierend auf der klassischen Zwei-Spiegel-Konstruktion**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Fahrzeugbau
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
Firma Laser Zentrum Nord GmbH
Am Schleusengraben 14
21029 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Alexander Piskun
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Georg Cerwenka

Abgabedatum: 06.12.2016

Jurij Kaiser

Thema der Bachelorthesis

Entwicklung und Konstruktion einer Laser-Ablenkeinheit basierend auf der klassischen Zwei-Spiegel-Konstruktion.

Stichworte

Laser-Remote-Technologie, Laserscanner, Galvanometerscanner, Ablenkeinheit.

Kurzzusammenfassung

In der vorliegenden Bachelorarbeit wird eine Laser-Ablenkeinheit basierend auf der klassischen Zwei-Spiegel-Konstruktion, die zu Forschungszwecken eingesetzt wird, konzipiert und konstruiert. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der methodischen Konstruktion unter Berücksichtigung der Aufgabenstellung. Zu der Vorrichtung gehören ein Gehäuse sowie zwei Befestigungsmechanismen, die die Galvanometermotoren halten und in eine gewünschte Stellung positionieren sollen. Die Befestigungsmechanismen werden so konzipiert, dass sowohl translatorische Bewegungen in die Richtung aller drei Achsen als auch Verkipfung der Motoren möglich sind. Für die Aufnahme des Laserpointers wird die gleiche Halterung mit angepasster Öffnung, wie für die beiden Galvanometerantriebe benutzt.

Jurij Kaiser

Title of the paper

Development and construction of a laser deflection unit based on the classical two-mirror design.

Keywords

Laser remote technology, laser scanner, galvanometer scanner, deflection unit.

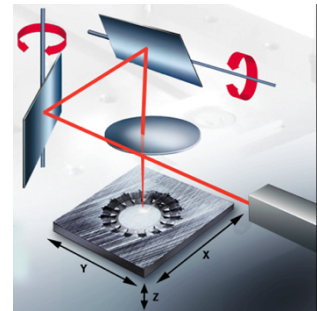
Abstract

In this Bachelor thesis, a laser deflection unit is designed and constructed based on the classical two-mirror design, which is used for research purposes. The focus of this thesis is on the methodical design taking into account the task. The device includes a housing as well as two fastening mechanisms which are intended to hold the galvanometer motors and to position them in a desired position. The mounting mechanisms are designed in such a way that both translational movements in the direction of all three axes as well as rotatory movements around the X and Z axis of the motors are possible. To mount the laser pointer, the same bracket with a suitable opening as for the two galvanometer drives is used.

Bachelorarbeit / Projektarbeit

Entwicklung und Konstruktion eines Versuchsaufbaus für eine Laser-Ablenkeinheit basierend auf der klassischen Zwei-Spiegel-Konstruktion

Laser mit hohen Leistungen haben sich heutzutage als effektives Werkzeug in der Materialbearbeitung etabliert, beispielsweise beim Schweißen oder Schneiden von Metallen. Laserlicht lässt sich durch Linsen und Spiegel gezielt formen, sodass die Fokusslage des Laserstrahls definiert auf dem Werkstück positioniert werden kann. Die Bewegung des Laserlichts und der Fokusslage auf dem Werkstück kann dabei durch ein Handhabungsgerät, beispielsweise einen Industrieroboter, variiert werden. Eine wesentlich schnellere Möglichkeit für die Führung des Laserstrahls stellen sogenannte Scannersysteme dar. Dabei wird der Laserstrahl mithilfe von Spiegeln gezielt abgelenkt. Die Spiegel lassen sich dabei über Motoren ausrichten, sodass die Drehung der Spiegel eine Bewegung des Laserstrahls auf dem Werkstück zur Folge hat, wie dies in der nebenstehenden Abbildung dargestellt ist.



In dieser Arbeit soll ein Versuchsaufbau für eine klassische Zwei-Spiegel-Ablenkeinheit entwickelt und konstruiert werden. Der Versuchsaufbau soll so gestaltet werden, dass die beiden Ablenkeinheiten beliebig zueinander positioniert und ausgerichtet werden können. Als Lichtquelle soll eine schwache Laserquelle genutzt werden, deren Wellenlänge im sichtbaren Bereich liegt, beispielsweise ein Laserpointer. Bei der Konstruktion des Versuchsaufbaus soll darauf geachtet werden, dass die beiden Ablenkeinheiten sicher an dem Versuchsstand angebracht werden und die Positionen und Ausrichtungen genau bestimmt oder abgelesen werden können. Die Aufgaben für diese Arbeit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Einarbeitung in die Scanner-Technologie, speziell in die Zwei-Spiegel-Bauweise
- Entwicklung und Konstruktion eines Versuchsstandes für eine Ablenkeinheit mit den oben genannten Anforderungen im CAD-Programm CATIA V5
- Schriftliche Dokumentation des entwickelten Konzepts

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Laser-Remote-Technologie in der industriellen Anwendung.....	1
1.2 Firmenvorstellung.....	3
1.3 Stand der Technik	3
1.4 Ziel der Arbeit.....	5
1.5 Inhalt der Arbeit.....	6
2 Laser-Remote-Schweißtechnologie	8
2.1 Funktionsbeschreibung	8
2.2 Ablenkeinheit.....	10
3 Methodische Konstruktion	12
3.1 Vorbetrachtung.....	12
3.2 Planen	14
3.2.1 Marktanalyse	14
3.2.2 Lastenheft.....	14
3.3 Konzipieren und Entwerfen	15
3.3.1 Teilfunktionen	15
3.3.2 Ideenfindung für die Teilfunktionen	17
3.4 Finden der Gesamtlösung	24
3.4.1 Mögliche Lösungen	26
3.4.2 Bewerten der Konzeptvarianten	26
4 Konstruktion der Ablenkeinheit.....	30
4.1 Das Gehäuse - Profilbauweise.....	30
4.2 Kippfunktion.....	31
4.3 Verschiebefunktion.....	35
4.4 Halterung und Längsverschiebung.....	37
5 Montageanleitung.....	39
6 Zusammenfassung und Ausblick	44
6.1 Zusammenfassung.....	44
6.2 Ausblick	45
7 Literaturverzeichnis	46

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Laseranwendungen im Automobilbau	2
Abbildung 2: 2D Galvo System (thorlabs, 2016)	4
Abbildung 3: 2D Galvo System (RAYLASE, 2016)	4
Abbildung 4: 2D Galvo System (Scanlab, 2016)	4
Abbildung 5: Umlenkung des Laserstrahls durch Etalon (Fuhrland, 2008)	5
Abbildung 6: Pre-Objective-Scanning	9
Abbildung 7: Post-Objective-Scanning	9
Abbildung 8: Pre-Objektive-Scanning mit weiteren Modulen	10
Abbildung 9: Laserstrahl-Ablenkeinheit	11
Abbildung 10: Möglichkeiten der Kostenbeeinflussung	12
Abbildung 11: Vorgehensplan zur Schaffung neuer Produkte nach VDI-Richtlinie 2222, Blatt 1	13
Abbildung 12: Teil- und Unterfunktionen	16
Abbildung 13: Morphologischer Kasten mit Lösungsvarianten	25
Abbildung 14: Gehäuse	30
Abbildung 15: Aluprofil	31
Abbildung 16: Eckverbinder	31
Abbildung 17: Kardanische Aufhängung	32
Abbildung 18: Äußerer Rahmen	32
Abbildung 19: Innerer Rahmen	33
Abbildung 20: Führung mit Schraube	33
Abbildung 21: Lagerung - äußerer Rahmen	34
Abbildung 22: Lagerung - innerer Rahmen	34
Abbildung 23: CD-ROM-Laufwerk	35
Abbildung 24: Gleitstange mit Plastikbuchse	35
Abbildung 25: U-Profil	36
Abbildung 26: Einsatz von Gleitschienen	36
Abbildung 27: Horizontale Skala	37
Abbildung 28: Vertikale Skala	37
Abbildung 29: Aufnahme des Galvanometerantriebs	38
Abbildung 30: Galvanometer	38
Abbildung 31: Schritt eins	39
Abbildung 32: Schritt zwei	39
Abbildung 33: Schritt drei	40
Abbildung 34: Schritt vier	40
Abbildung 35: Schritt fünf	41
Abbildung 36: Schritt sechs	41
Abbildung 37: Schritt sieben	42
Abbildung 38: Schritt acht (a)	42
Abbildung 39: Schritt acht (b)	43
Abbildung 40: Schritt neun	43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispiele für laserbasierte Fertigungsverfahren, eingeteilt nach den sechs Hauptgruppen der Norm DIN 8580 (Schweier, 2015)	1
Tabelle 2: Beispiele für Laser-Ablenkeinheiten	4
Tabelle 3: Ideen für das Gehäuse	17
Tabelle 4: Ideen für die Führung	18
Tabelle 5: Ideen für die Positionierung	19
Tabelle 6: Ideen für die Ablesefunktion	20
Tabelle 7: Ideen für die Arretierung	21
Tabelle 8: Ideen für den rotatorischen Mechanismus	22
Tabelle 9: Ideen für die Aufnahme von Galvanometerantrieben	23
Tabelle 10: Beurteilungskriterien mit Erläuterung zur Punktevergabe	28
Tabelle 11: Bewertung der Lösungsvarianten	29

1 Einleitung

Dieses Kapitel gibt einen Überblick, womit sich diese Arbeit auseinandersetzt. Es wird ersichtlich, welche Rolle heutzutage die Laser-Remote-Technologie für die Industrie spielt und welche Vorteile diese Technologie hat, die sich u.a. die Automobilindustrie zu Nutze macht. Eine kurze Vorstellung des kooperierenden Instituts untermauert den breiten Einsatzbereich und die Bedeutung der Lasertechnik. Im Abschnitt 1.3 „Stand der Technik“ werden einige Firmen und deren Produkte vorgestellt. Außerdem werden in diesem Abschnitt die möglichen Abweichungen erläutert, denen ein Laserstrahl unterworfen ist, wenn er umgelenkt wird. Im letzten Abschnitt dieses Kapitels wird die Motivation für die Konstruktion der Ablenkeinheit deutlich.

1.1 Laser-Remote-Technologie in der industriellen Anwendung

Die Laserstrahlung ist heutzutage nicht mehr aus der industriellen Anwendung wegzudenken. Der Einsatz der Laserstrahlung findet in den Fertigungsprozessen aus allen sechs Hauptgruppen der Fertigungsverfahren nach der Deutschen Industrienorm 8580 (DIN 8580) statt (Schweier, 2015). Im Folgenden sind die sechs Hauptgruppen der Fertigungsverfahren nach der Norm DIN 8580 mit jeweils einem Einsatzbeispiel für die Laserstrahlung aufgeführt:

Tabelle 1: Beispiele für laserbasierte Fertigungsverfahren, eingeteilt nach den sechs Hauptgruppen der Norm DIN 8580 (Schweier, 2015)

Hauptgruppe nach Norm DIN 8580	Beispiel eines laserstrahlbasierten Verfahrens	Quelle
1 Urformen	Selektives Laserschmelzen	(Branner, 2010)
2 Umformen	Laserstrahlbiegen von Flugzeugrumpfschalen	(Hornfeck, 2008)
3 Trennen	Laserstrahl-Abtragschneiden von metallischen Werkstoffen	(Lütke, 2011)
4 Fügen	Laserstrahlschweißen von Automobilkarosserien	(Sovetchenko, 2007)
5 Beschichten	Fliehkraftunterstütztes Laserbeschichten	(Angstenberger, 2012)
6 Stoffeigenschaften ändern	Laserstrahlhärten	(Standfuß, 1999)

Vier große Vorteile beim Einsatz des Laser-Remote-Schweißens lassen diese Technik unentbehrlich werden:

- **Flexibilität** (es können beliebig komplizierte, dreidimensionale Schnitte erzeugt und Nahtgeometrien bearbeitet werden) (Trumpf, 2016)
- **Verzugsarm** (durch vergleichsweise geringen Energieeintrag in das Werkstück wird der thermisch bedingte Verzug sehr gering) (Scanlab, 2016)
- **Berührungslos** (durch den großen Arbeitsabstand ist der Einsatz mit Industrierobotern möglich) (Scanlab, 2016)
- **Geschwindigkeit** (die sehr hohe Positioniergeschwindigkeit durch die Scannerachsen spart Zeit und reduziert die Anzahl der benötigten Roboter-Einheiten. Dies spiegelt sich nicht zuletzt in sinkenden Kosten wieder) (Froschmeier-Hanss, 2013)

Die Automobilindustrie setzt eine Vielzahl unterschiedlicher Laserstrahl-Fertigungsverfahren ein. Die folgende Abbildung zeigt, wo heute die Laser-Remote-Technologie im Automobilbau eingesetzt wird:

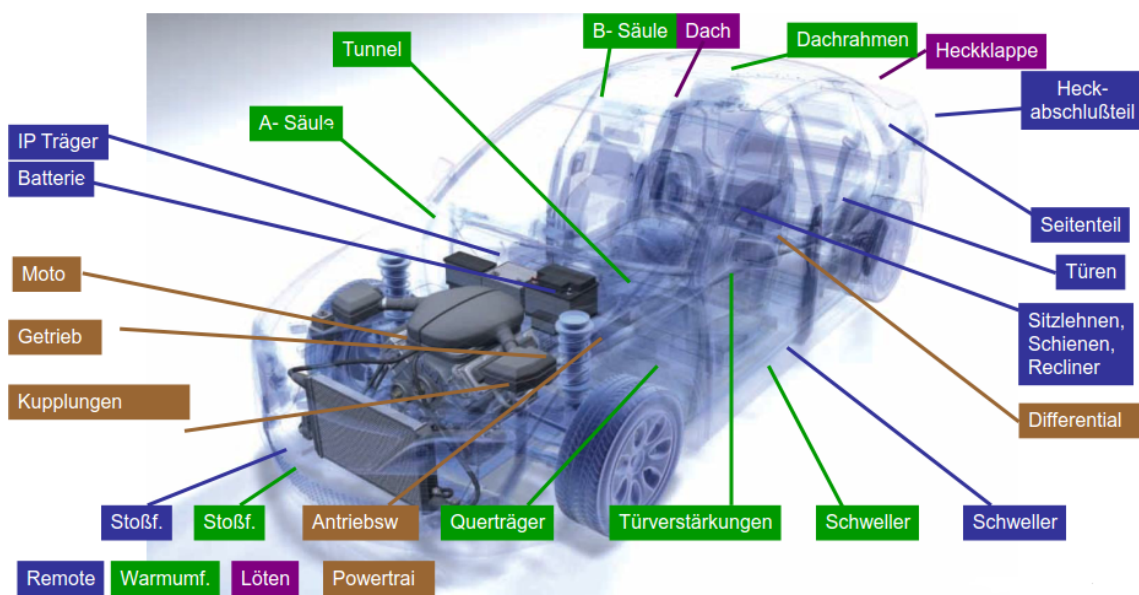


Abbildung 1: Laseranwendungen im Automobilbau (Laser Community, 2016)

Die genannten Vorteile der Laser-Remote-Technologie nutzt längst nicht nur die Automobilindustrie. Immer mehr mittelständische Unternehmen aus dem metallverarbeitenden Gewerbe wenden diese Technologie an (Laser Technik Journal, 2013).

1.2 Firmenvorstellung

Die LZN Laser Zentrum Nord GmbH wurde im Jahr 2009 gegründet und ist ein stetig wachsendes Unternehmen der photonischen Industrie. Das LZN hat sich dem Ziel verschrieben, „den Wissens- und Technologietransfer von der Grundlagenforschung in die industrielle Anwendung entscheidend zu fördern“ (LZN, 2016). Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten des LZN umfassen von der Beratung über die Konstruktion und den Prozess die vollständige Fertigungskette bis hin zum fertigen Produkt und der Planung einer industriellen Umsetzung. Das Unternehmen fokussiert seine Aktivitäten auf sechs Laserkompetenzfelder:

- Robotergestützte Laserblechbearbeitung (RoLAS)
- Schiffbau und Transportsysteme (ShipLAS)
- Innovativer Werkzeug- und Maschinenbau (ToolLAS)
- Lasergestützte Fertigung von Medizinprodukten (MedLAS)
- Laserver- und bearbeitung von synthetischen Werkstoffen (SynLAS)
- Innovativer Leichtbau (AirLAS)

1.3 Stand der Technik

Eine ausführliche Recherche hat ergeben, dass es mehrere Unternehmen gibt, die Laser-Ablenkeinheiten vertreiben. Im Prinzip sind alle auf dem Markt angebotenen Laser-Ablenkeinheiten ähnlich aufgebaut.

In den folgenden Abbildungen werden einige Beispiele präsentiert. Die Unterschiede bestehen hauptsächlich darin, dass verschieden leistungsstarke Galvanometerscanner eingebaut werden. Der Grund für den Einsatz unterschiedlicher Motoren sind die unterschiedlichen Laserleistungen. Mit steigender Laserleistung werden größere Spiegel eingesetzt um die Laserenergie besser zu verteilen.

Tabelle 2: Beispiele für Laser-Ablenkeinheiten

 <p>Abbildung 2: 2D Galvo System (thorlabs, 2016)</p>	<p>Diese High-Speed-Scanning Galvanometer Systeme eignen sich für die Laserstrahlenlenkung mit Laserstrahlen, die kleiner als 5 mm im Durchmesser sind.</p>
 <p>Abbildung 3: 2D Galvo System (RAYLASE, 2016)</p>	<p>2D MINISCAN Serie für Laserstrahl bis zu 9 mm. Geeignet für folgende Anwendungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Markieren/Beschriften • Bohren • Schneiden • Schweißen • Härten • Texturieren
 <p>Abbildung 4: 2D Galvo System (Scanlab, 2016)</p>	<p>Der intelliDRILL ist für höchstdynamische Positionieranwendungen (Jump and Shoot) geeignet.</p>

Der Vollständigkeit halber sind noch die Firmen Scansonic und Trumpf zu erwähnen, die unterschiedliche Lasersysteme vertreiben. Die meisten der Firmen werben damit, dass ihre Geräte höchste Geschwindigkeiten erreichen und hoch präzise sind, wie zum Beispiel die Firma Von.Jan Technology (VON.JAN TECHNOLOGY, 2016). Jedoch zeigen viele Studien, dass alle Systeme, bei denen ein Laserstrahl durch Spiegel abgelenkt wird, den Bahnverzerrungen des Laserstrahls unterworfen sind (Hafez, Sidler, & Salathe´, 2002). In einigen Dissertationen und Studien wurden folgende Fehlerquellen untersucht und Korrekturmaßnahmen erarbeitet

- Aufschwingen der Spiegel auf Grund von hohen Drehmomenten (Sehr dünne Spiegel können sich durch hohe Winkelbeschleunigung in axiale Richtung verformen, woraus Abbildungsfehler entstehen könnten).
- Abweichung der Laserachse (Der Laserstrahl soll senkrecht zur Spiegelachse verlaufen. Sonst kommt es zu systematischen Verfälschungen der Messergebnisse).
- Abweichung der Spiegelachse (Die Spiegelachse soll horizontal verlaufen. Es werden ähnliche Verfälschungen der Ergebnisse wie bei der Abweichung der Laserachse erwartet).
- Die Lage des Auftreffpunktes des einfallenden Laserstrahls auf den Spiegel (Die besten Ergebnisse werden erzielt, wenn der Laserstrahl genau in die Mitte des Spiegels trifft) (Hafez, Sidler, & Salathe', 2002), (Fuhrland, 2008).

Die Recherche hat gezeigt, dass fast alle gefundenen Studien eine theoretische Betrachtung des Wirkungsprinzips zeigen. Lediglich eine Dissertation von Herrn Matthias Fuhrland beschreibt Abweichungen des abgelenkten Laserstrahls, die auch experimentell nachgewiesen wurden (Fuhrland, 2008). Der Unterschied zu der Konstruktion, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wird, ist, dass es in der erwähnten Dissertation um die Umlenkung des Laserstrahls durch ein Etalon geht (Abbildung 5).

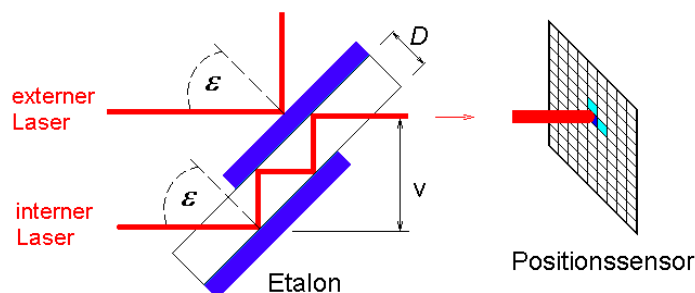


Abbildung 5: Umlenkung des Laserstrahls durch Etalon (Fuhrland, 2008)

Obwohl der Laserstrahl nicht durch zwei Spiegel abgelenkt wird, werden in der Dissertation ähnliche Fehlerquellen mit konkreten Problemlösungen diskutiert. Untersuchungen zu Fehlerquellen bei der Konstellation, dass der Laserstrahl durch zwei Spiegel abgelenkt wird, wurden nicht gefunden.

1.4 Ziel der Arbeit

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll eine Laser-Ablenkeinheit konstruiert werden, die zu Forschungszwecken eingesetzt werden soll. Bei den Scannersystemen werden die Ablenkspiegel durch Galvanometerantriebe um ihre eigene Längsachse gedreht. Bei den gängigen Ablenkeinheiten stehen die Galvanometerantriebe festmontiert senkrecht zueinander. Wie bereits im Abschnitt 1.3 „Stand der Technik“ erwähnt, gibt es in Scannersystemen mehrere Fehlerquellen. Mit Hilfe der zu konstruierenden Ablenkeinheit soll das Verhalten des Laserstrahls genau untersucht werden. Die

Galvanometer werden absichtlich so positioniert, dass der Laserstrahl eine nicht optimale Ausgangsposition für die Ablenkung besitzt. Dafür soll im Rahmen dieser Bachelorarbeit eine Ablenkeinheit konstruiert und konzipiert werden, bei der die Galvanometerantriebe sechs Freiheitsgrade haben.

Unter anderem sollen damit verschiedene Softwaremodule, wie zum Beispiel Kalibrationssoftware, getestet werden. Es wird untersucht, welche Auswirkungen der durch die Verstellung der Antriebe abgelenkte Laserstrahl hat und ob die theoretischen Untersuchungen mit dem realen Verhalten des Laserstrahls übereinstimmen. Außerdem ist vorgesehen, die Laser-Ablenkeinheit für die Aus- und Weiterbildung zu nutzen.

Die Aufgabe umfasst folgende Punkte:

- Einarbeitung in die Scanner-Technologie, speziell in die Zwei-Spiegel-Bauweise
- Konstruktion des Gehäuses
- Konstruktion der beweglichen Scannerbefestigung (genaue Anforderungen folgen im Lastenheft)
- Konstruktion der beweglichen Befestigung für den Laserpointer
- Anleitung für die Montage der Ablenkeinheit
- Schriftliche Dokumentation des entwickelten Konzepts
- Ein prototypischer Aufbau der Ablenkeinheit wird nicht erwartet

1.5 Inhalt der Arbeit

Die hier vorliegende Arbeit ist folgendermaßen aufgebaut:

Im Kapitel 2 werden die Grundlagen der Laser-Remote-Schweißtechnologie beschrieben. Der Abschnitt enthält Informationen über die Funktionsweise sowie über das Einsatzgebiet der Laser-Remote-Schweißtechnologie. Im Anschluss folgt die Beschreibung der typischen Laser-Ablenkeinheit basierend auf der klassischen Zwei-Spiegel-Konstruktion.

Den Schwerpunkt dieser Arbeit bildet die methodische Konstruktion. Die Vorgehensweise der Konstruktionsentwicklung wird in der Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2222, Blatt 1 bestimmt (Beuth, 2016). Kapitel 3 umfasst die ersten drei Phasen der erwähnten Richtlinie. Das Kapitel beinhaltet

- die Entwicklung verschiedener Teilfunktionen
- die Erarbeitung mehrerer möglicher Lösungen
- sowie die abschließende Bewertung.

Durch die systematische Bewertung der möglichen Komplettlösungen fällt eine sachorientierte Entscheidung welches Konzept weiterentwickelt werden soll.

Kapitel 4 beschreibt die Konstruktion einzelner Teilfunktionen. Es wird ersichtlich, wie einzelne Lösungen entstanden sind und wie die eine oder andere Schwierigkeit gelöst wurde. Durch die diesem Kapitel beigefügten Abbildungen der einzelnen Funktionen

sowie der gesamten Ablenkeinheit wird ein guter Überblick über die Konstruktion, ohne ein 3D-Modell in Catia V5 öffnen zu müssen, gegeben.

Da die Gesamtkonstruktion viele, unter anderem kleine, Teile beinhaltet und nur in einer bestimmten Reihenfolge aufgebaut werden kann, bedarf es einer genauen Anleitung für den Zusammenbau. Diese Montageanleitung ist im Kapitel 5 enthalten.

Mit der Zusammenfassung und einem Ausblick bildet das Kapitel 6 den Abschluss der Bachelorarbeit.

2 Laser-Remote-Schweißtechnologie

Das Laserschweißen durchlief in den letzten zwanzig Jahren eine enorme Entwicklung. Während früher mit CO²-Laserstrahlung einfache Schweißoperationen möglich waren, sind heute durch den Einsatz von Laserscannern Hochleistungsanwendungen in der Makromaterialbearbeitung möglich (Schweier, 2015, S. 2).

In diesem Kapitel wird auf die Funktionsweise der Laser-Remote-Schweißtechnologie eingegangen. Außerdem wird der Aufbau von zwei gängigen Laserstrahl-Remote-Schweißapparaten erläutert. Abschließend folgt die Beschreibung der Scannereinheit der Remoteoptik.

2.1 Funktionsbeschreibung

Laser-Remote-Schweißen ist eine Variante des Laserstrahlschweißens, wobei die Rolle der Strahlablenkung Spiegel übernehmen und nicht ein externes Führungssystem wie bei einem konventionellen Schweißkopf. Unter „Remote“ ist die entfernte Positionierung des Laserstrahls gemeint. Es können Entfernungen zum Bauteil bis zu einem Meter sein (LZN, 2016). Die Schweißoptik für das Laserstrahl-Remote-Schweißen besteht nicht nur aus einer Ablenkeinheit. Wie man der Abbildung 8 entnehmen kann sind weitere Scanner-Module eingebaut. Um die Flexibilität, die durch das Scanner-Modul ohnehin schon sehr hoch ist, weiter zu steigern, lässt sich die Schweißoptik samt der Ablenkeinheit an einen Knickarmroboter anbringen. Das Zusammenspiel zwischen der Schweißoptik mit einem Scanner-Modul und einer beweglichen Führungsmaschine ermöglicht Schweißoperationen die mit konventionellen Laserschweißköpfen nur mit enormem Aufwand realisierbar wären. Außerdem entfällt das zeitaufwändige Positionieren der Optik, was das Laserstrahl-Remote-Schweißen sehr attraktiv für die Serienproduktion werden lässt.

Es gibt zwei gängige Prinzipien die für den Aufbau von Laserstrahl-Remote-Schweißapparaten verwendet werden:

- Pre-Objective-Scanning
- Post-Objective-Scanning

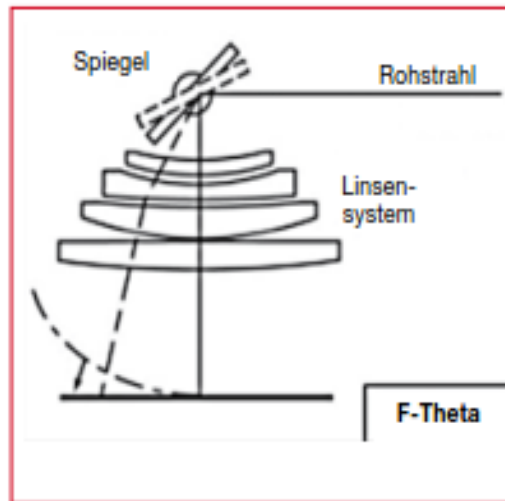


Abbildung 6: Pre-Objective-Scanning (Laser Technik Journal, 2013)

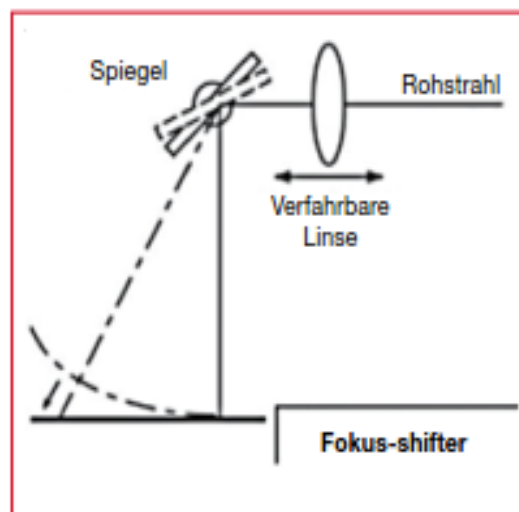


Abbildung 7: Post-Objective-Scanning (Laser Technik Journal, 2013)

Beim Pre-Objective-Scanning fokussiert ein Plan-Feld-Objektiv (F-Theta-Objektiv) den bereits abgelenkten Laserstrahl. Das F-Theta-Objektiv sorgt dafür, dass der Laserstrahl immer auf den Brennpunkt fokussiert ist. Eine weitere Wirkung des F-Theta-Objektivs ist dass der Brennpunkt in der Arbeitsebene senkrecht zur optischen Achse des Objektivs liegt (Scanlab, 2016).

Beim Post-Objective-Scanning hingegen muss der Laserspot bei der Veränderung der Z-Lage der Scannerposition neu eingestellt werden. Der Laserstrahl wird durch die

sogenannte Fokussierlinse (verfahrbare Linse) fokussiert und dann durch eine Ablenkeinheit abgelenkt. Die folgende Abbildung zeigt einen schematischen Aufbau einer Remoteoptik mit weiteren Modulen (Laser Technik Journal 4/2013 S 29).

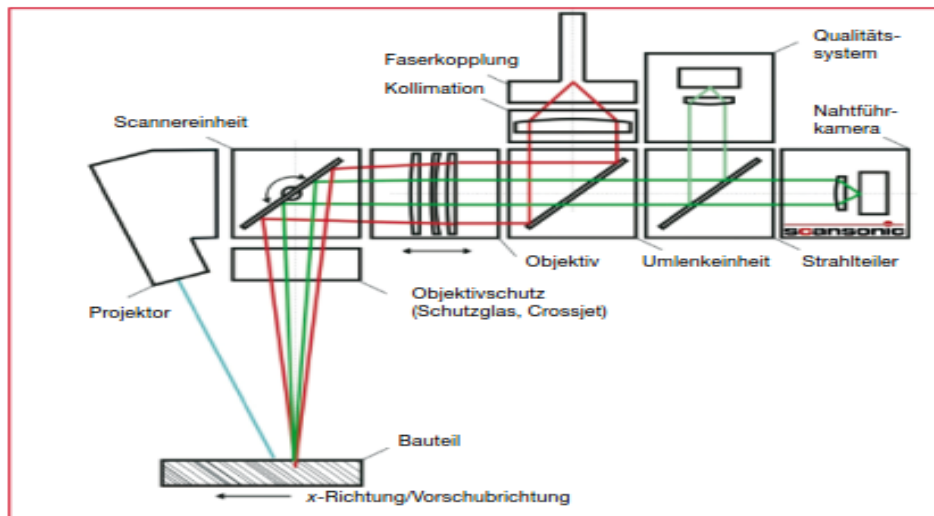


Abbildung 8: Pre-Objektive-Scanning mit weiteren Modulen

(Laser Technik Journal, 2013)

Im nächsten Abschnitt wird kurz darauf eingegangen wie eines der Module, nämlich die Scannereinheit aufgebaut ist.

2.2 Ablenkeinheit

Wie man der Abbildung 8 entnehmen kann, besteht eine Remoteoptik aus mehreren Modulen. Es ist unter anderem eine Umlenkeinheit zu sehen, in der der Laserstrahl nur durch einen Spiegel umgelenkt wird. Die folgende Abbildung 9 zeigt den Aufbau der Scannereinheit. Wie man sieht, wird der Laserstrahl durch zwei Spiegel abgelenkt. Es gibt auf dem Markt Hochgeschwindigkeitsscanner, die eine Geschwindigkeit bis zu 200 m/sec erreichen (RAYLASE, 2016). Der durch die Eintrittsöffnung einfallende Laserstrahl trifft als erstes auf einen senkrecht zu ihm stehenden Spiegel und wird weiter zum zweiten Spiegel und dann zu der Austrittsöffnung der Ablenkeinheit abgelenkt. Für das Drehen der Spiegel werden sogenannte Galvanometerscanner benötigt. Durch das gleichzeitige Drehen der Spiegel wird der Laserstrahl sehr schnell in X- und Y-Richtung abgelenkt.

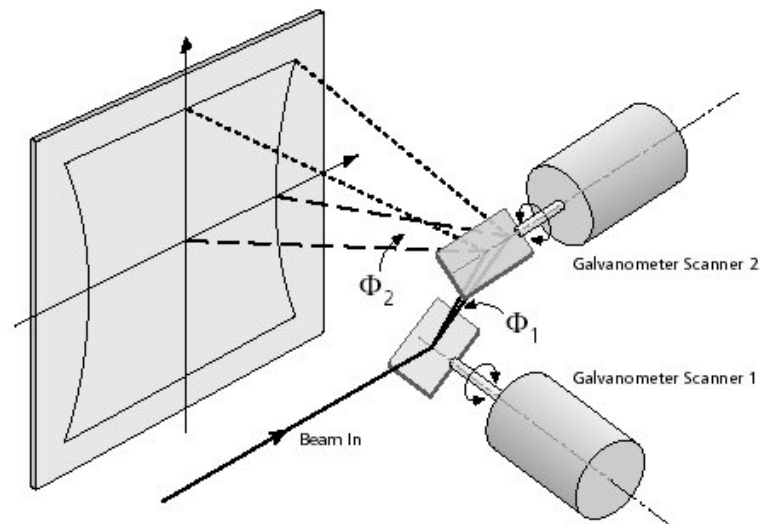


Abbildung 9: Laserstrahl-Ablenkeinheit (RAYLASE, 2016)

Den Spiegeln kommt in der Lasertechnik eine hohe technische Bedeutung zu. Ihre Qualität beeinflusst stark die Ergebnisse der laserbasierten Verfahren. Es werden zwei Spiegelarten unterschieden:

- Metallspiegel
- Interferenzspiegel

Um den Einfluss des Wärmeausdehnungskoeffizienten zu minimieren wird für die Metall-Oberflächenspiegel als Trägermaterial Glas oder Glaskeramik eingesetzt. Diese Werkstoffe haben sehr niedrige Wärmeausdehnungskoeffizienten, wodurch ihre thermische Längenausdehnung nahezu gegen Null geht (Londig & Pannhorst, 1985). Diese Eigenschaft lässt aus diesen Werkstoffen gefertigte Spiegel formstabil bleiben. So kann die Abweichung des reflektierten Laserstrahls auf Grund der hohen Materialtemperatur minimiert werden (Schröder G. , 1990). Auf den Träger wird im Hochvakuum Metall und eine Schutzschicht aufgedampft. Welches Metall für die Beschichtung verwendet wird, hängt vom Wellenlängenbereich des zu reflektierenden Lichts ab. Der Reflexionsgrad solcher Spiegel beträgt zwischen 89% und 96%. Die Interferenzspiegel erreichen deutlich höhere Werte unter der Voraussetzung, dass die Wellenlänge und der Einfallswinkel exakt aufeinander abgestimmt sind (Treiber, 1982). Bei dieser Art von Spiegeln wird ein mehrschichtiger Aufbau zu Grunde gelegt. Alle Schichten haben unterschiedliche Brechungsindexe, sodass es an jeder Grenzschicht Reflexionen gibt. Bei einer richtig angepassten Beschichtung kann die Reflexion so gut wie verlustfrei geschehen (Fuhrland, 2008).

3 Methodische Konstruktion

In diesem Kapitel geht es um die Erarbeitung einer Lösung für die Aufgabenstellung. Im ersten Abschnitt wird zunächst auf die Bedeutung des methodischen Konstruierens eingegangen. Im Anschluss werden die einzelnen Schritte des methodischen Konstruierens erläutert.

3.1 Vorbetrachtung

Von einer Idee bis zur Markteinführung eines technischen Produktes ist es ein langer Weg. Ein wesentlicher Schritt ist dabei die Konstruktion. Eines der wichtigsten Kriterien dafür ob ein Produkt erfolgreich ist, ist die Wirtschaftlichkeit. Der Konstruktionsbereich spielt bei der Produktentwicklung eine wichtige Rolle und bestimmt den wirtschaftlichen Erfolg entscheidend mit. Die folgende Abbildung macht deutlich, dass der Konstruktionsbereich die Gesamtkosten eines Produktes wesentlich beeinflusst, wenngleich er zu der Kostenentstehung vergleichsweise wenig beiträgt. Aufgrund dieser Tatsache ist es enorm wichtig den Konstruktionsbereich ständig zu optimieren (Rolof/Matek Maschinenelemente).

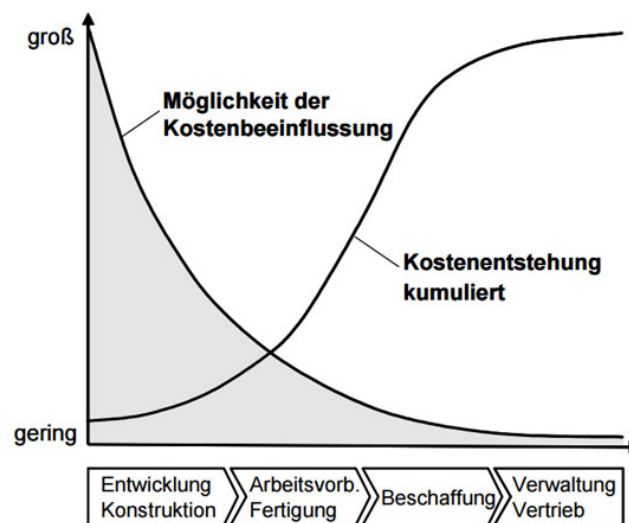


Abbildung 10: Möglichkeiten der Kostenbeeinflussung (CustomInteractions, 2016)

Da die meisten zu konstruierenden Geräte aus mehreren Einzelteilen bestehen, kann es bei der Kombination von Lösungsansätzen zu einer großen Anzahl von Lösungsvarianten kommen. Aus diesem Grund sind konstruktionsmethodische Hilfsmittel unerlässlich. Eines dieser Hilfsmittel ist die VDI-Richtlinie 2222. Nach der VDI-Richtlinie 2222, Blatt 1 wird der Entwicklungs- und Konstruktionsprozess in sieben Arbeitsschritte untergliedert, die in der Praxis im maschinenbaulichen Konstruktionsprozess in vier Hauptphasen zusammengefasst werden. Die Abbildung 11 zeigt die einzelnen Phasen, die den Phasen zugeordneten Tätigkeiten sowie die Zeitpunkte, wann die Entscheidungen getroffen werden sollen, die den Übergang zur nächsten Phase ermöglichen. In der Praxis sind auch Zwischenentscheidungen möglich.

Die Zwischenentscheidungen sind in der Abbildung nicht dargestellt (Rolof/Matek Maschinenelemente, S. 9).

<p>Phase 1: Planen</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Trendstudien, Marktanalyse, Patentlage • Festlegen des Entwicklungsauftrages • Klären der Aufgabenstellung • Ausarbeiten der Anforderungsliste
<p>Phase 2: Konzipieren</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Aufgliedern der Gesamtfunktion in Teilfunktionen • Suchen nach Lösungsprinzipien und Bausteinen zum Erfüllen der Teilfunktionen • Kombinieren von Lösungsprinzipien zum Erfüllen der Gesamtfunktion • Erarbeiten von Konzeptvarianten für die Prinzipkombinationen • Technisch-wirtschaftliches Bewerten der Konzeptvarianten (Auswählen des Lösungskonzepts)
<p>Phase 3: Entwerfen</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellen eines maßstäblichen Entwurfs • Technisch-wirtschaftliches Bewerten des Entwurfs • Erstellen eines verbesserten Entwurfs • Optimieren der Gestaltungszonen • Festlegen des bereinigten Entwurfs
<p>Phase 4: Ausarbeiten</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Gestalten und Optimieren der Einzelteile • Ausarbeiten der Ausführungsunterlagen (Zeichnungen, Stücklisten, Anweisungen) • Herstellen und Prüfen eines Prototyps, z.B. bei Serienfertigung • Überprüfung der Kosten

Abbildung 11: Vorgehensplan zur Schaffung neuer Produkte nach VDI-Richtlinie 2222, Blatt 1 (Rolof/Matek Maschinenelemente, S. 10)

3.2 Planen

3.2.1 Marktanalyse

Die erste Phase des Konstruktionsprozesses nach der Aufgabendefinition beinhaltet unter anderem die Marktanalyse. Dieser Teil der Arbeit wurde bereits im Abschnitt 1.3 „Stand der Technik“ behandelt. Es stellte sich heraus, dass es auf dem Markt keine Angebote gibt die zur Lösung der Aufgabe beitragen könnten. Keiner der gefundenen Anbieter hat eine Ablenkeinheit im Sortiment, bei der sich die Galvanometer in irgendeiner Form verschieben lassen. Von daher ist es erforderlich die Ablenkeinheit selber zu konstruieren. Die auf dem Markt vorhandenen Produkte sind nicht dafür geeignet, in konstruktiver Hinsicht als Orientierung genutzt zu werden.

3.2.2 Lastenheft

Das Lastenheft ist ein wichtiger Baustein einer Produktentwicklung. Das ist sozusagen der Einstieg in die kreative Phase. Hier werden die Anforderungen an den Auftragnehmer notiert. Die untenstehenden Anforderungen und Wünsche an die zu konstruierende Ablenkeinheit wurden mit dem Betreuer dieser Arbeit definiert.

1. Sicherheit:

Die Gesamtkonstruktion darf offen sein da nur eine Laserquelle mit einer Leistung < 1 mW eingesetzt wird.

Es dürfen keine langen, spitzen Teile herausragen.

2. Gewicht:

Die Gesamtkonstruktion mit allen Anbauteilen sollte ein geringes Gewicht aufweisen (maximal 10 kg)

3. Robustheit:

Die Konstruktion soll sehr stabil sein. Durch schnelle Spiegelbewegungen darf die Konstruktion nicht instabil werden.

4. Translatorische Verschiebung der Galvanometer:

Die Galvanometer sollen sowohl seitlich als auch entlang der Z-Achse um ± 50 mm verschiebbar sein.

Eine Verschiebung der Galvanometer von ± 20 mm entlang der eigenen Achsen soll erreicht werden können.

5. Verkipfung:

Jeder der Galvanometerantriebe soll einzeln sowohl um die Z-Achse als auch um die X-Achse gleichzeitig um $\pm 30^\circ$ gekippt werden können.

Beim gleichzeitigen Kippen der Galvanometerantriebe ist der Kippwinkel um die beiden Achsen nicht genau festgelegt. 15° wird als ein Wunsch festgehalten.

6. Bestimmung der Position:

Jede eingestellte Position der Motoren soll eindeutig bestimmbar und messbar sein.

7. Kosten und Fertigung:

Wenn möglich sollen einzelne Teile auf dem Markt erhältlich sein.

Die Teile, die nicht gekauft werden können, sollen in der eigenen Werkstatt hergestellt werden können.

8. Wartung:

Einfache Austauschbarkeit der Motoren

3.3 Konzipieren und Entwerfen

In dieser Phase wird die Gesamtaufgabe in Teilfunktionen unterteilt. Für jede einzelne Teilfunktion werden mögliche Lösungen vorgestellt, die im Anschluss analysiert und zur Auswahlentscheidung gestellt werden. Darüber hinaus werden die unterschiedlichen Entwürfe analysiert und mit Hilfe des morphologischen Kastens bewertet.

3.3.1 Teilfunktionen

Der nächste Schritt in der Entwicklung einer Neukonstruktion ist die Definition der Teilfunktionen. Mit Hilfe eines Brainstormings werden die einzelnen Teilfunktionen in einer Mindmap verzeichnet.

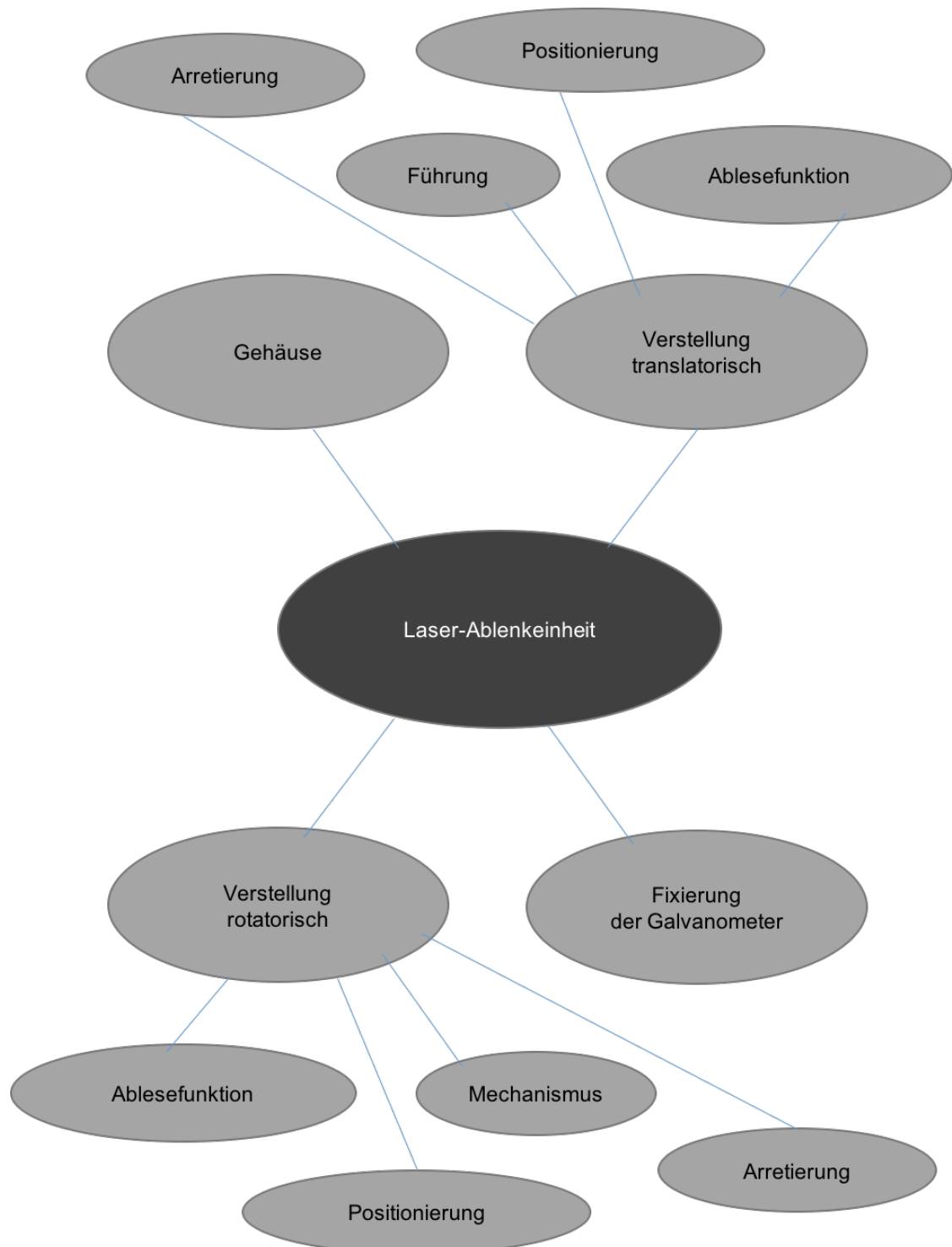


Abbildung 12: Teil- und Unterfunktionen

Die Mindmap in der Abbildung 12 zeigt, dass die Laser-Ablenkeinheit in vier Teilfunktionen aufgeteilt wird, die sich wiederum in Unterfunktionen unterteilen. Die Hauptfunktion einer Laser-Ablenkeinheit ist das Ablenken des Laserstrahls. Um die Aufgabenstellung zu strukturieren wird die Hauptfunktion in folgende Teilfunktionen untergliedert:

- Aufnahme/-Fixierung der Galvanometerantriebe

- Verstellmechanismus translatorisch
- Verstellmechanismus rotatorisch
- Gehäuse

Der translatorische Verstellmechanismus erfordert eine Führung, eine Möglichkeit zur Positionierung und Arretierung sowie eine Anzeige zum Ablesen der genauen Position des Galvanometers. Ähnlich ist die Funktion der rotatorischen Verstellmöglichkeit untergliedert. Bei den Unterfunktionen ist anstelle der Führung ein komplexer Mechanismus zu finden. Im Abschnitt 3.3.2 werden Abbildungen mit den verschiedenen Ideen für die einzelnen Teilfunktionen dargestellt, die die Grundlage für den morphologischen Kasten bilden. Die Erläuterung zum morphologischen Kasten folgt im Abschnitt 3.4.

3.3.2 Ideenfindung für die Teilfunktionen

Tabelle 3: Ideen für das Gehäuse

Teilfunktion Bild und Quelle	Erläuterung
 <p>(Rexrout Bosch Group, 2016)</p>	<p>Das Gehäuse wird aus so genannten Boschprofilen zusammengesetzt.</p> <ul style="list-style-type: none"> • offener Aufbau • leicht • einfacher Zusammenbau
 <p>(www.fertigungsverfahren48.de/, 2016)</p>	<p>Das Gehäuse besteht aus Blechen, die an den Kanten zusammengeschweißt werden.</p> <ul style="list-style-type: none"> • geschlossener Aufbau • Schweißarbeiten nötig
 <p>(Mankenberg, 2016)</p>	<p>Das Gehäuse wird aus massiven Blöcken ausgefräst.</p> <ul style="list-style-type: none"> • vergleichsweise schwer • teuer

Tabelle 4: Ideen für die Führung

Teilfunktion Bild und Quelle	Erläuterung
 <p>(RC-Netzwoirk.de, 2016)</p>	<p>Linearführungen mit Gleitstangen als Führungselement.</p>
 <p>(Leschhorn, 2016)</p>	<p>Linearführungen mit Gleitelementen aus iglidur® sind verschleißfest und austauschbar.</p>
 <p>(MechaPlus, 2016)</p>	<p>Rollenführungswagen sind sehr leichtgängig. Die Schiene kann durch das Verstellen der mittleren Exzenterrolle leicht eingestellt werden.</p>
 <p>(Leschhorn, 2016)</p>	<p>Die Teleskopschienen der Firma Teleskopschienen24 werden in hochmodernen Rollformanlagen gefertigt und haben somit einen besonders ruhigen präzisen Lauf. Die Stahlkugeln verdrängen bei jedem Hub den Schmutz aus der Führung. Dadurch haben die Auszüge eine hohe wartungsfreie Lebensdauer (teleskopschienen24, 2016).</p>
 <p>(NORELEM, 2016)</p>	<p>Präzise Schlittenführungen aus dem Werkstoff GJL 250 werden unter anderem eingesetzt im Maschinen-, Vorrichtungs- und Messgerätebau sowie in der optischen und feinmechanischen Industrie.</p>

Tabelle 5: Ideen für die Positionierung



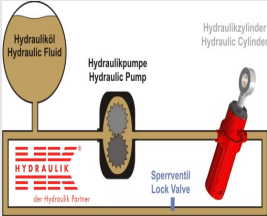


Teilfunktion Bild und Quelle	Erläuterung
 <p>(Tamawa, 2016)</p>	<p>Kraftübertragung durch Pneumatik:</p> <ul style="list-style-type: none"> Die Konstruktion wird mit Hilfe eines Pneumatikzylinders bewegt.
 <p>(https://65.media.tumblr.com, 2016)</p>	<p>Handkraft:</p> <ul style="list-style-type: none"> Die Galvanometer werden auf dem direkten Weg nur durch menschliche Kraft in die benötigte Position gebracht.
 <p>(der hydraulik Partner, 2016)</p>	<p>Hydraulische Krafteinbringung:</p> <ul style="list-style-type: none"> Externe Energiequelle nötig
 <p>(der himmlische Höllein, 2016)</p>	<p>Gewindestange:</p> <ul style="list-style-type: none"> Die Konstruktion bewegt sich entlang der drehenden Gewindestange.
 <p>(colourbox, 2016)</p>	<p>Kettenantrieb:</p> <ul style="list-style-type: none"> Durch das Drehen des Sternrads wird die Konstruktion bewegt. Eignet sich besser für die rotatorische Bewegung.

Tabelle 6: Ideen für die Ablesefunktion

Teilfunktion Bild und Quelle	Erläuterung
 <p>(http://previews.123rf.com, 2016)</p>	<p>Lineare Skala:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die Position der Galvanometer wird an der linearen Skala abgelesen. • Einfache Lösung der Problemstellung.
 <p>(http://us.123rf.com, 2016)</p>	<p>Dreh-Skala:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anbringung der Drehskala an einer Schraube oder Mutter. • Eignet sich gut falls das Bauteil mit Hilfe einer drehenden Schraube positioniert wird.
 <p>(http://thumbs4.ebaystatic.com, 2016)</p>	<p>Digital:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nach der Verstellung des Bauteils misst ein Sensor den Abstand vom Nullpunkt bis zum Bauteil. Der Abstand wird auf einer digitalen Anzeige angezeigt. • Im Vergleich zu den beiden vorstehenden Methoden sehr teuer. • Sehr genau.

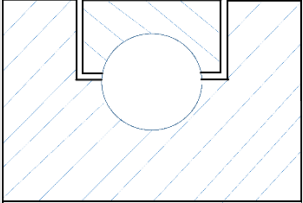
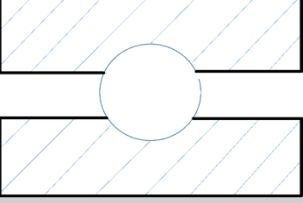
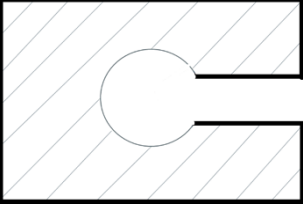
Tabelle 7: Ideen für die Arretierung

Teilfunktion Bild und Quelle	Erläuterung
 <p>(TentenBoats, 2016)</p>	<p>Arretierung durch einen Bolzen oder einen Stift:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die Konstruktion wird in einer bestimmten Position mit Hilfe eines Bolzens verriegelt. • Die Positionsänderung ist nur stufenweise möglich. • Es sind mehrere Bohrungen nötig, damit verschiedene Positionen eingestellt werden können.
 <p>(Jungheinrich Profishop, 2016)</p>	<p>Arretierung mit Haken:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die Konstruktion wird mit Hilfe eines Hakens in einer bestimmten Position verriegelt. • Es ist eine begrenzte Anzahl an Positionen möglich.
 <p>(der himmlische Höllein, 2016)</p>	<p>Gewindestange:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die Konstruktion wird durch das Drehen einer Gewindestange in die benötigte Position gebracht und gleichzeitig arretiert.
 <p>(www.ch-forrer.ch, 2016)</p>	<p>Pressen mit Schraube:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die Konstruktion wird mit Hilfe einer Schraube an eine Führungsschiene gepresst und dadurch verriegelt. • Es sind unbegrenzt viele Positionen möglich.

Tabelle 8: Ideen für den rotatorischen Mechanismus

Teilfunktion Bild und Quelle	Erläuterung
 <p>(EBAY, 2016)</p>	<p>Kugellagerung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gleichzeitiges Kippen in alle Richtungen möglich. • Gleichzeitig auch als Aufnahmefunktion des Antriebes. • Komplizierte Lösung für Ablesefunktion notwendig.
 <p>(Spektrum.de, 2016)</p>	<p>Kardanaufhängung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gleichzeitiges Kippen in alle Richtungen möglich. • Für die Ablesefunktion kann eine lineare Skala verwendet werden.
 <p>(PresseClicker, 2016)</p>	<p>Hexapod:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gleichzeitiges Kippen in alle Richtungen möglich. • Gleichzeitig auch als Aufnahmefunktion des Antriebes. • Komplizierte Lösung für Ablesefunktion notwendig.
 <p>(http://www.arthrovitan.de, 2016)</p>	<p>Scharnieraufhängung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nur um eine Achse drehbar. • Für die Ablesefunktion kann eine lineare Skala verwendet werden.

Tabelle 9: Ideen für die Aufnahme von Galvanometerantrieben

Teilfunktion Bild	Erläuterung
	<p>Alublock: Einspannung des Galvanometers durch einen zusätzlichen, kleineren Alublock.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Für den Austausch der Galvanometer ist nur der Abbau des kleineren Blocks notwendig. • Gut geeignet für den häufigeren Wechsel von Galvanometern mit unterschiedlichen Durchmessern.
	<p>Zwei gleiche Alublöcke die durch zwei lange Schrauben zusammengezogen werden und dadurch das Galvanometer einspannen.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gut geeignet für den häufigeren Wechsel von den Galvanometern mit unterschiedlichen Durchmessern.
	<p>Aus dem Alublock wird ein Teil herausgefräst. Das Einspannen des Galvanometers erfolgt mit Hilfe einer langen Schraube, die beide Teile des Alublocks zusammenzieht.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Beim Austausch von Galvanometern wird die Demontage der Spiegel nicht zu vermeiden sein, da diese meistens einen größeren Durchmesser haben, als die Galvanometer.

3.4 Finden der Gesamtlösung

Der morphologische Kasten ist eine Methode, die sehr gut für Produktinnovationen, Produktverbesserungen und Produktneukombinationen jeglicher Art geeignet ist. Mit Hilfe eines morphologischen Kastens ist es möglich auch sehr komplexe Problemstellungen zu erfassen. Besonders gut eignet sich diese Methode für Menschen die eine schematische Denkweise haben (Schröder A. , 2016). Der morphologische Kasten stellt eine Matrix dar, in die die einzelnen Teilfunktionen sowohl bildlich als auch mit kurzen Stichworten eingetragen werden. Als nächstes werden mögliche Lösungsvarianten gebildet. Zur besseren Übersicht werden die einzelnen Funktionen durch farbige Linien verbunden. Danach werden die Lösungsmöglichkeiten mittels eines Wertigkeitsverfahrens bewertet. Das Konzept mit der besten Bewertung wird ausgearbeitet.

Alle Quellenangaben zu den Abbildungen im Morphologischen Kasten sind dem Abschnitt 3.3.2 zu entnehmen.

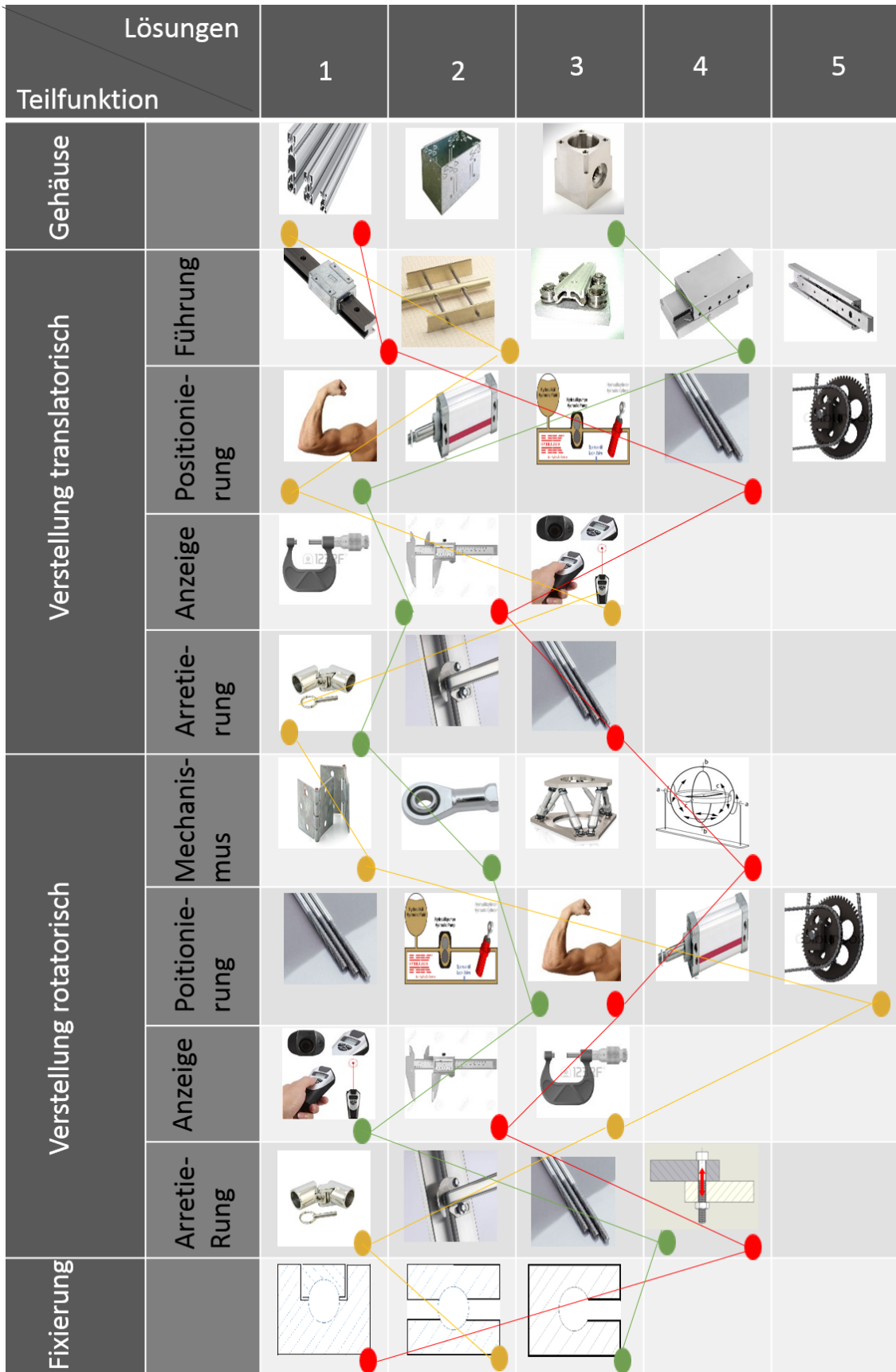


Abbildung 13: Morphologischer Kasten mit Lösungsvarianten

3.4.1 Mögliche Lösungen

Lösungsvariante 1: Das Gehäuse besteht aus leichten Aluprofilen. Für die Vorrichtung der Kippfunktion wurde das Prinzip einer Kardanaufhängung übernommen, die am Gehäuse montiert wird. Die Galvanometer werden in einer Platte fixiert. Als Führungen für die Verschiebung in horizontale oder vertikale Richtung sind sowohl Gleitstangen als auch eine lineare Führung mit einem U-Profil vorgesehen. Mit Hilfe jeweils einer Gewindestange werden die Galvanometerantriebe in die gewünschte Position auf der X- und Z-Achse gebracht. Die Arretierung der gekippten Position der Galvanometerantriebe geschieht durch eine Schraube. Zum Ablesen der genauen Position sind für diese Lösungsvariante lineare Skalen angedacht.

Lösungsvariante 2: Das Gehäuse besteht aus zwei gefrästen Teilen. An die Rückwände der beiden gefrästen Teile werden präzise Schlittenführungen angebracht. Für diese Variante werden zusätzlich zwei stabile Seitenwände konstruiert, an die die zweiten Hälften der beiden Schlittenführungen anmontiert werden. Die gefrästen Gehäuseelemente werden an den präzisen Schlittenführungen auf der vertikalen Achse per Hand bewegt und in der gewünschten Position mit Hilfe eines Stiftes oder Bolzens arretiert. Die Seitwärtsbewegung wird durch Verschieben der Seitenwände gewährleistet. Die Position wird auch hier an einer linearen Skala abgelesen. Für die Kippfunktion ist für diese Lösungsvariante ein Kugelgelenk vorgesehen, das gleichzeitig die Aufnahmefunktion für die Galvanometerantriebe übernimmt. Auch die gewünschten Neigungen sollen mit Handkraft eingestellt werden. Genauso wie die translatorische Verschiebung werden auch die Kipppositionen mit Hilfe einer Schraube arretiert. Die neue Position der Antriebe wird digital gemessen und angezeigt.

Lösungsvariante 3: Variante drei hat das gleiche Gehäuse wie die Variante eins. Für die translatorischen Verschiebungen sind Gleitstangen vorgesehen. Die Positionierung wird hier per Hand erledigt. Die Arretierung passiert wie in der Variante zwei mit Hilfe eines Stiftes oder Bolzens. Das Messen und Anzeigen der Positionen in horizontaler und vertikaler Richtung übernimmt ein digitales Messgerät. Der Aufbau der Kippvorrichtung erinnert an das konventionelle Dreh-Kipp-Fenster. Die gewünschte Neigung wird durch das Betätigen des Kettenantriebes erreicht. Für die Ablesefunktion eignet sich in diesem Fall eine Dreh-Skala sehr gut. Für die Fixierung der Kippposition ist ein Stift oder ein Bolzen vorgesehen. Für die Aufnahme der Galvanometerantriebe eignen sich zwei Alublöcke, die durch zwei Schrauben zusammengezogen werden.

3.4.2 Bewerten der Konzeptvarianten

Die im Kapitel 3.4 ausgewählten Lösungsvarianten werden im nächsten Schritt bewertet, um die optimale Lösung für die Problemstellung zu finden. Unter einer optimalen Lösung versteht man die Erfüllung der Gesamtfunktion unter Berücksichtigung möglichst vieler Wünsche mit dem geringsten wirtschaftlichen Aufwand. Dafür wird ein besonderes Bewertungsverfahren angewendet. Bei der Aufstellung der morphologischen Matrix ist es noch nicht möglich eine Aussage über die Herstellungskosten der

Gesamtkonstruktion zu machen. Es ist jedoch möglich die Kosten von Teilfunktionen grob einzuschätzen. Für die Bewertung werden zunächst Beurteilungskriterien mit Gewichtung festgelegt. Dazu werden die wesentlichen Eigenschaften aus der Anforderungsliste ausgewählt und nach ihrer Bedeutung gewichtet (Rolof/Matek Maschinenelemente, S. 13). Die Wertung sowie die Gewichtung der einzelnen Kriterien werden entweder nach dem Ermessen des Konstrukteurs oder mit Hilfe einer Dominanzmatrix festgelegt. In dieser Arbeit wurden die Punkte basierend auf logischen Überlegungen vergeben. Der Gedankengang für die Festlegung der Gewichtungsgröße der einzelnen Beurteilungskriterien wird in der Tabelle 10 kurz erläutert.

Tabelle 10: Beurteilungskriterien mit Erläuterung zur Punktevergabe

Beurteilungskriterien	Erläuterung
Zielerfüllung	Das wichtigste Kriterium ist die „Zielerfüllung“. Alle Anforderungen sollen möglichst erfüllt werden. Das Kriterium erhält die maximale Gewichtung von 5 Punkten.
Gewicht	Die Laser-Ablenk-Einheit wird meistens von einer Person bedient. Es soll auch möglich sein, dass die gesamte Konstruktion von einer Person getragen wird. Aus diesem Grund wird für das Kriterium „Gewicht“ der Wert von 4 Punkten vergeben.
Stabilität	Da die Spiegel sehr hohe Geschwindigkeiten erreichen ist es wichtig, dass die gesamte Konstruktion stabil ist. Ein instabiler Aufbau kann zur Verfälschung der Ergebnisse beitragen. Insofern wird für das Kriterium „Stabilität“ ein Wert von 4 Punkten vergeben.
Kosten und Fertigung	Da ein begrenztes Budget für die Konstruktion vorgesehen ist, sollen die meisten Komponenten in eigener Werkstatt produziert oder kostengünstig erworben werden. Die eigene Firmenwerkstatt ist nicht dafür ausgelegt, sehr komplexe Bauteile herzustellen. Die Gewichtung für das Kriterium „Kosten und Fertigung“ erhält 3 Punkte.
Zugänglichkeit	Es soll möglich sein zu jeder Zeit die Antriebe oder die Spiegel auszutauschen. Das wird in allen drei Lösungsvarianten möglich sein. Der Unterschied wird sich nur im Zeitaufwand spiegeln. Von daher wird die Gewichtung für das Kriterium „Zugänglichkeit“ mit dem Wert 2 eingeschätzt.
Design	Die Konstruktion benötigt kein besonderes Design. In erster Linie sollen die funktionalen Anforderungen erfüllt werden. Die Gewichtung von 1 Punkt ist für das Kriterium „Design“ ausreichend.

In der folgenden Tabelle werden die im Kapitel 4.2 ausgewählten Konzeptvarianten hinsichtlich der sechs technischen Anforderungskriterien beurteilt.

Tabelle 11: Bewertung der Lösungsvarianten

Technische Anforderungen	G	Variante 1		Variante 2		Variante 3		Ideal	
		E	E*G	E	E*G	E	E*G	E	E*G
Zielerfüllung	5	4	20	4	20	3	15	5	25
Gewicht	5	5	25	3	15	5	25	5	25
Stabilität	4	4	16	5	20	4	16	5	20
Kosten und Fertigung	3	4	12	2	6	3	9	5	15
Zugänglichkeit	2	3	6	5	10	3	6	5	10
Design	1	2	2	4	4	2	2	5	5
Summe			81		75		73		100
Technischer Wert		0,81		0,75		0,72		1,0	

Demnach ist die Variante 1 die optimale Lösung. In den beiden folgenden Kapiteln werden die einzelnen Teilfunktionen sowie die fertige Konstruktion mit der Montageanleitung beschrieben. Zu den Beschreibungen der Teilfunktionen werden Auszüge aus dem Programm Catia V5 mit Abbildungen beigelegt.

4 Konstruktion der Ablenkeinheit

In diesem Kapitel wird die Konstruktion einzelner Teilfunktionen erläutert. Das 3D-Modell wird mit der Software Catia V5 erzeugt. Catia V5 ermöglicht nicht nur die Konstruktion eines 3D-Modells, sondern ist auch für die Simulation, Berechnung des Gewichtes, die Durchführung der Tests am virtuellen Modell sowie für die Ableitung der zwei- oder dreidimensionalen Zeichnungen geeignet.

4.1 Das Gehäuse - Profilbauweise

Das Gehäuse muss prinzipiell vier Dinge erfüllen:

1. Es muss selbsttragend sein.
2. Es muss möglichst einfach und kostengünstig zu fertigen sein.
3. Es muss die Kräfte, die durch die Galvanometer entstehen, problemlos aufnehmen können.
4. Es darf die vorgegebenen Bewegungsfreiheiten der Galvanometer nicht einschränken.

Wie in der Abbildung 14 zu sehen ist, besteht das Gehäuse aus Aluprofilen.

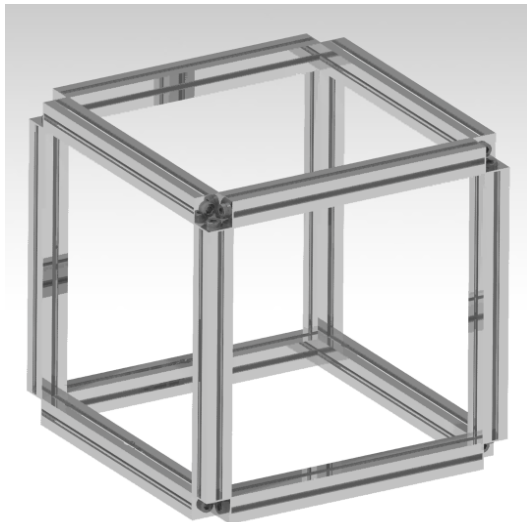


Abbildung 14: Gehäuse

Solche Aluprofile sind auch unter dem Namen Boschprofile bekannt. Dieser Aufbau erfüllt sämtliche obengenannten Anforderungen. Alle nötigen Bauteile für diese Konstruktion lassen sich kostengünstig beschaffen. Jedes der Profile ist 300 mm lang. In der Abbildung 15 ist der Querschnitt des Profils mit den Abmessungen dargestellt. Die Aluprofile durch so genannte Eckverbinder (Abbildung 16) miteinander verbunden. Ein Vorteil dieser Konstruktion liegt darin, dass das gesamte Gehäuse nur ca. 5 kg wiegt, was für eine hohe Mobilität der Konstruktion sorgt. Der Einsatz einer Plexiglasplatte verschafft dem Gehäuse noch mehr Stabilität. Ein wesentlicher Punkt, der für diese

Konstruktion spricht, sind die vergleichsweise niedrigen Anschaffungs- und Fertigungskosten. Ein weiterer wichtiger Vorteil so einer Konstruktion liegt darin, dass die gesamte Ablenkeinheit offen ist. Der offene Aufbau ermöglicht eine ständige Beobachtung des Laserstrahls. Die Plexiglasplatte beeinträchtigt die Vorteile der „offenen“ Konstruktion keinesfalls. Auch gute Kompatibilität der Aluprofile mit dem rotatorischen Mechanismus, der im nächsten Unterkapitel vorgestellt wird, untermauert die Entscheidung für diese Art des Gehäuseaufbaus.

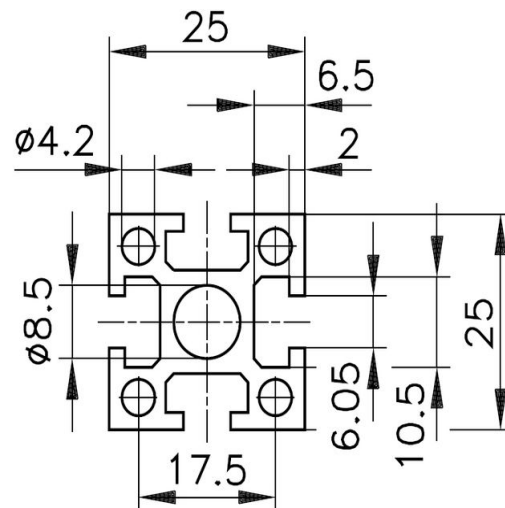


Abbildung 15: Aluprofil

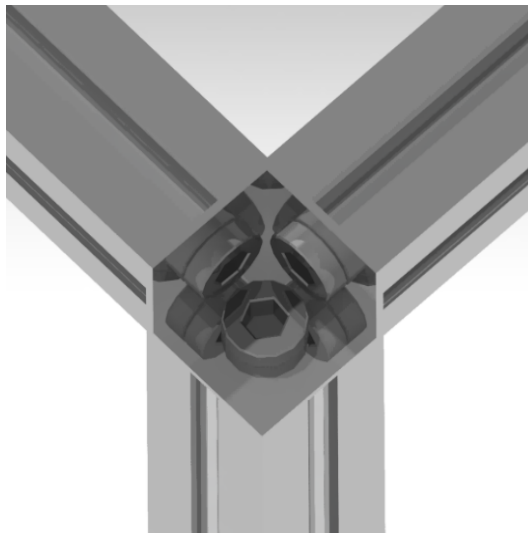


Abbildung 16: Eckverbinder

4.2 Kippfunktion

Wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben sollen die Galvanometer um zwei Achsen kippbar sein. Die kardanartige Aufhängung, die die Anforderungen erfüllen soll, wird detailliert vorgestellt.

Schon um 280-220 v. Chr. wurde vermutlich eine kardanische Aufhängung von Philon von Byzanz verwendet. Für ihn diente die Konstruktion als ein Hilfsmittel um die Tinte nicht zu verschütten (Karl-Heinz Schlot, 2002). Die kardanische Aufhängung besteht aus drei Ringen, die senkrecht zu einander gelagert sind. Alle dieser Ringe können nach Bedarf gleichzeitig um die senkrecht aufeinander stehenden Achsen gedreht werden (Spektrum.de, 2016). Zum besseren Verständnis siehe die folgende Abbildung:

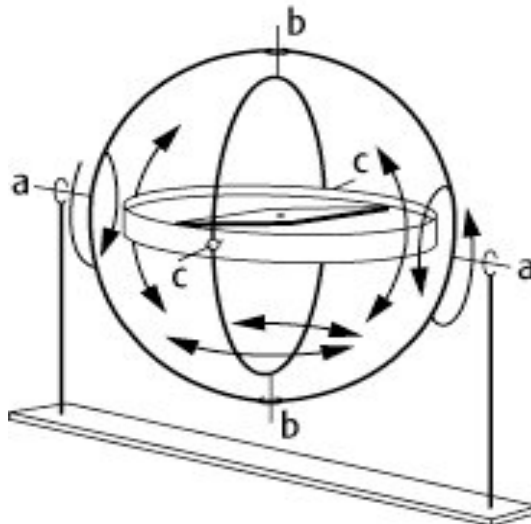


Abbildung 17: Kardanische Aufhängung (Spektrum.de, 2016)

Für die Kippkonstruktion der Ablenkeinheit werden keine drei Ringe, sondern rechteckige Rahmen eingesetzt. Für die Erfüllung der Aufgabenstellung reichen zwei Rahmen aus. Der äußere schwenkbare Rahmen (Abbildung 18) ist um die Z-Achse drehbar. Der Drehumfang ist auf 60 Grad beschränkt - 30 Grad in jede Richtung.

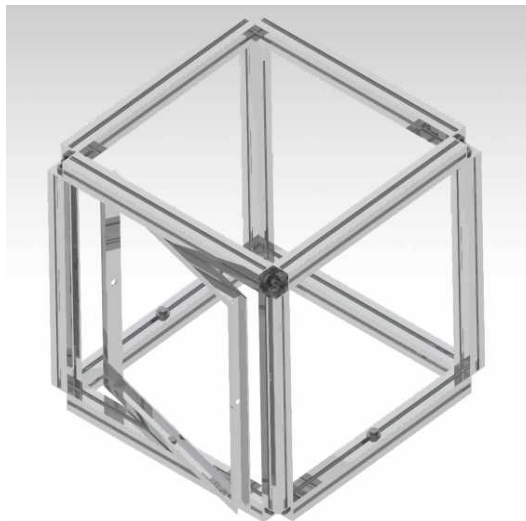


Abbildung 18: Äußerer Rahmen

Der zweite (innere) Rahmen (Abbildung 19) hat eine horizontale Drehachse und kann so wie der äußere Rahmen um 30 Grad in jede Richtung gekippt werden. Die beiden

Rahmen werden mit Hilfe von jeweils einer gebogenen Längsscheibe geführt (Abbildung 20).

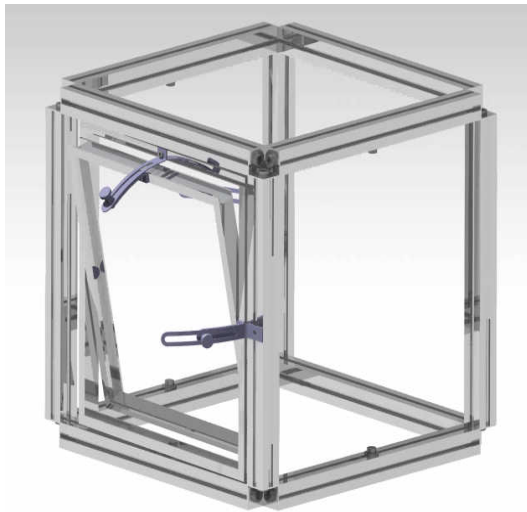


Abbildung 19: Innerer Rahmen

Die in der Abbildung 20 zu sehende Schraube dient der Fixierung des Rahmens in der gewünschten Position. Auf beiden Führungsscheiben ist jeweils eine Skala eingraviert, die das Ablesen der Neigungswinkel ermöglicht. Die gleiche Konstruktion wird auch für das Kippen des zweiten Galvanometers aufgebaut. Um eine Berührung beim gleichzeitigen Kippen beider Konstruktionen zu vermeiden, wird einen etwas größerer Spalt zwischen dem äußeren Rahmen und dem Gehäuse vorgesehen. Falls die Forscher der Firma LZN zu dem Entschluss kommen sollten, dass ein gleichzeitiges Kippen beider Galvanometerantriebe nicht notwendig ist, kann der Spielraum auf ein Minimum reduziert werden. Dies ist innerhalb kürzester Zeit zu erledigen. Dadurch, dass die Konstruktion parametrisch aufgebaut ist, werden alle am äußeren Rahmen hängenden Elemente automatisch angepasst.

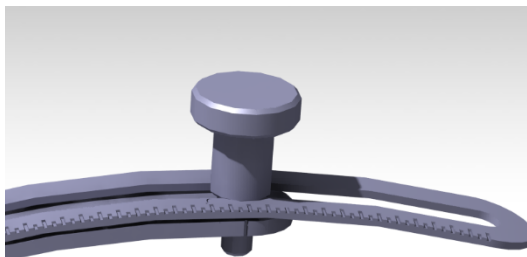


Abbildung 20: Führung mit Schraube

Die folgenden zwei Abbildungen zeigen wie die beiden Rahmen gelagert sind. Die Lagerung für den äußeren Rahmen sieht etwas einfacher aus als die für den inneren Rahmen. Das liegt unter anderem daran, dass die Konstruktion in einer bestimmten Reihenfolge zu montieren ist. Da das Gehäuse erst ganz zum Schluss aufgebaut wird,

kann der äußere Rahmen sozusagen vom Gehäuse eingeklemmt werden. So reicht das in der Abbildung 21 zu sehende Gleitelement völlig aus. Die Lagerung für den inneren Rahmen sieht etwas komplizierter aus. Der Grund dafür ist, dass sowohl der äußere als auch der innere Rahmen aus zusammengeschweißten U-Profilen besteht. Der Rahmen wird als Ganzes eingesetzt. Von daher ist der in der Abbildung 22 dargestellte Aufbau der Lagerung notwendig.

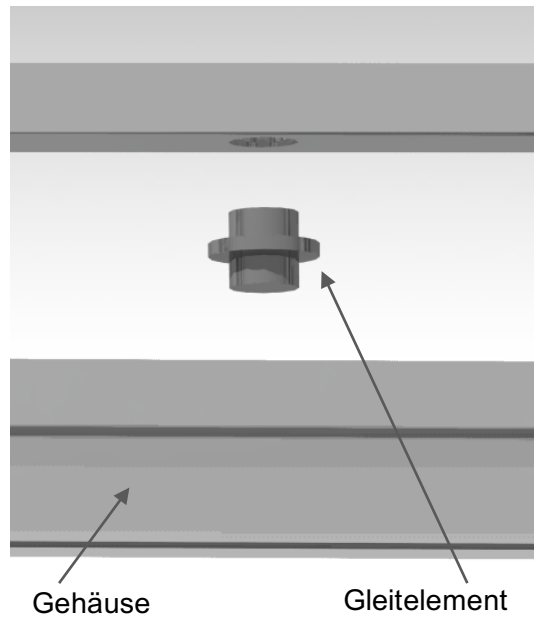


Abbildung 21: Lagerung - äußerer Rahmen

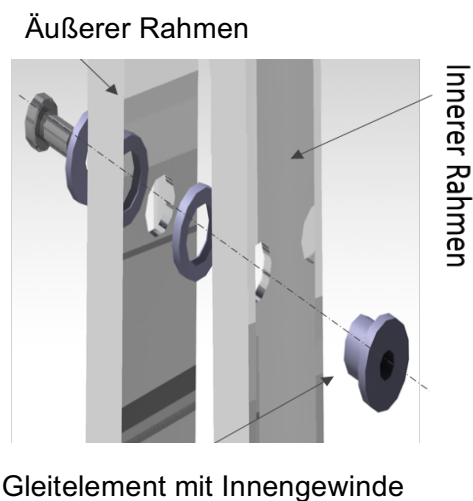


Abbildung 22: Lagerung - innerer Rahmen

4.3 Verschiebefunktion

Für die Verschiebung in horizontale sowie in vertikale Richtung wird das Prinzip wie es bei CD-ROM-Laufwerken zu finden ist, verwendet. (Abbildung 23).

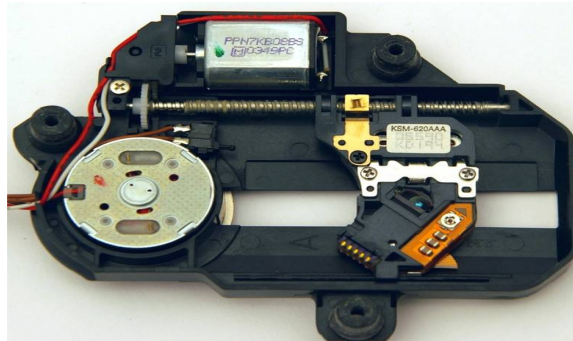


Abbildung 23: CD-ROM-Laufwerk

Für die horizontale Verschiebung werden eine Gewindestange und zwei Gleitstangen benötigt. Am Ende der Gewindestange wird ein Zahnrad angeschweißt. Die Gewindestange geht durch die Aluplatte, in die das passende Gewinde geschnitten ist. An beiden Enden ist die Gewindestange drehbar gelagert, sodass beim Drehen des Zahnrades die ganze Platte in horizontale Richtung bewegt wird. Die Führung der Aluplatte wird durch zwei Gleitstangen gewährleistet. Um den Reibungswiderstand zu reduzieren werden in die Öffnungen, durch die die Gleitstangen geführt werden, jeweils eine Plastikbuchse eingesetzt (siehe Abbildung 24).

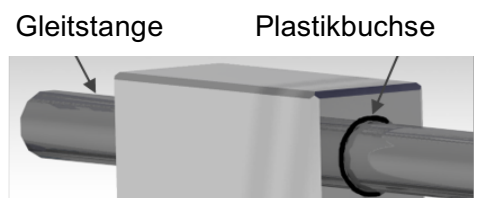


Abbildung 24: Gleitstange mit Plastikbuchse

Die Länge der Gewindestange sowie der beiden Gleitstangen orientiert sich an der Breite des Innenrahmens. Die Breite des Innenrahmens wird wiederum durch die Länge der Profile des Gehäuses bestimmt. So werden die Maße der ganzen Kardanaufhängung bei einer Änderung der Profillänge parametrisch angepasst.

Das gleiche Prinzip wird bei der Konstruktion für die Vertikalverschiebung der Galvanometerantriebe angewendet. In diesem Fall geht die Gewindestange jedoch durch einen der Alublöcke, die gleichzeitig mehrere Funktionen haben. Erstens hängt an ihnen die gesamte Konstruktion für die Horizontalverschiebung. Zweitens werden die Alublöcke von einer Seite so ausgefräst, dass sie die Form eines U-Profils bekommen (Abbildung 25).

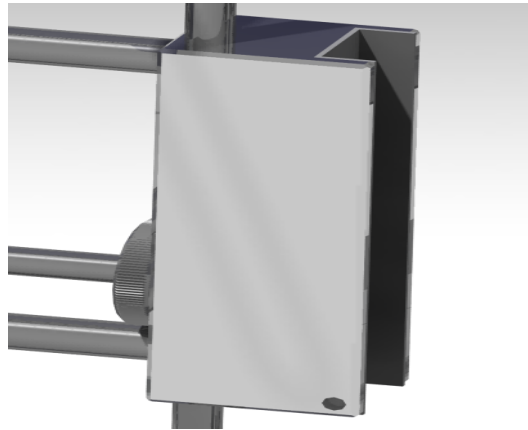


Abbildung 25: U-Profil

So können die Alublöcke gleichzeitig auch als Schlitten für die Führung eingesetzt werden. An dieser Stelle gibt es eine ähnliche Anforderung wie bereits im Unterkapitel 4.2 zur „Lagerung des inneren Rahmens“ beschrieben wurde: Der Mechanismus für die Horizontalverschiebung wird als erstes zusammengebaut und dann in den inneren Rahmen eingesetzt. Damit das technisch möglich ist, werden die U-förmigen Alublöcke so verändert, dass ein L-Profil entsteht. Nun kann der ganze Mechanismus von der Seite eingesetzt werden. Danach wird die zuvor ausgeschnittene Aluplatte wieder zu dem ursprünglichen U-Profil angeschraubt. Auf diesem Wege lässt sich das seitliche Herausfallen des Mechanismus verhindern. Für ein leichteres Gleiten werden in die beiden U-Profile Plastikbuchsen eingesetzt.

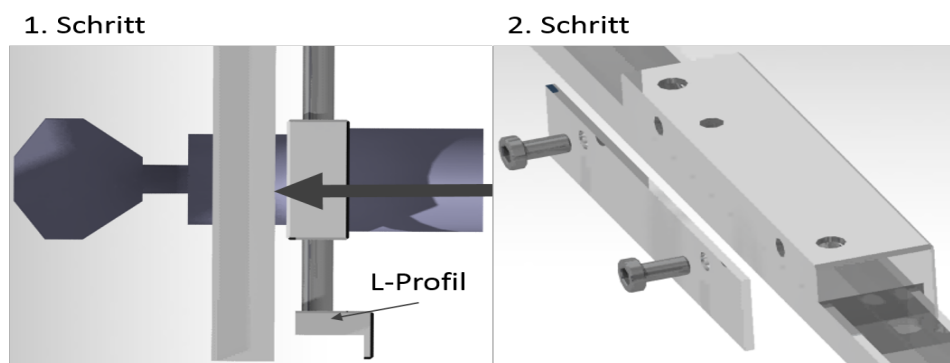


Abbildung 26: Einsatz von Gleitschienen

Die Rolle der Schienen entlang derer die Antriebe in vertikale Richtung fahren sollen, übernehmen die seitlichen Profile des inneren Rahmens. Das Bewegen des Galvanometerantriebes erfolgt genauso wie oben beschrieben - durch das Drehen des Zahnrades. Die Galvanometer können gleichzeitig sowohl in vertikale als auch in horizontale Richtung bewegt werden. Damit kann jede beliebige Position des Galvanometers in der X-Z Ebene schnell erreicht werden. Um die Position der Galvanometer zu bestimmen, sind zwei lineare Skalen in die Konstruktion integriert. Das eine Lineal ist so angebracht, dass es sich mit dem Galvanometerantrieb auf- und abwärts bewegt. An ihm wird die Position der Horizontalverschiebung abgelesen. Die

Vertikalverschiebung wird an dem zweiten Lineal abgelesen. Dieses Lineal ist am inneren Rahmen montiert.

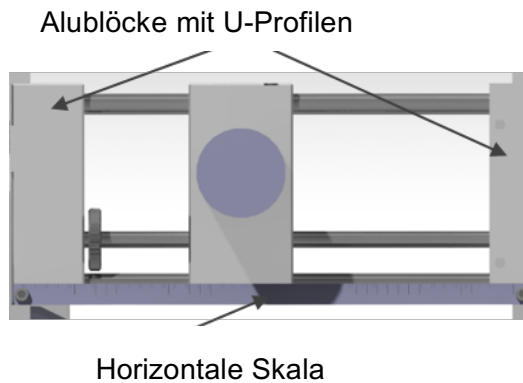


Abbildung 27: Horizontale Skala

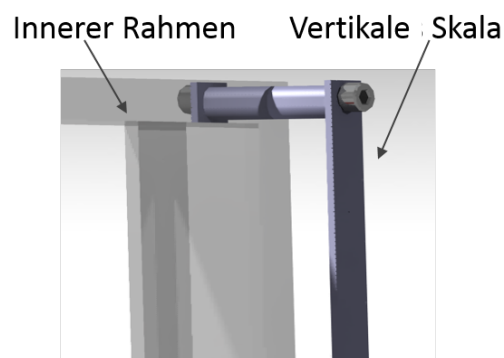


Abbildung 28: Vertikale Skala

4.4 Halterung und Längsverschiebung

Wie im Kapitel 4.1 erläutert gab es ursprünglich drei Ideen für die Halterung des Galvanometers. Bei der Bewertung der Gesamtkonzepte hatte die Variante 1 die meisten Punkte erhalten. Die praktische Umsetzung dieser Variante sieht wie folgt aus: Es werden zwei Aluminiumplatten mit den Maßen 106x50x20 mm angefertigt. Ungefähr in der Mitte der Platten werden je eine Öffnung mit einem Durchmesser von 18 mm bzw. 21,5 mm gebohrt. Den selben Durchmesser haben die beiden Galvanometerantriebe, die später eingesetzt werden. Falls irgendwann kleinere Antriebe eingesetzt werden sollen, kann man die Öffnung in der Platte durch den Einsatz einer Plastikbuchse auf den nötigen Durchmesser verkleinern. Beim Einsatz größerer Antriebe lässt sich der Abstand durch Schraubendrehung variieren. Angaben zu Toleranzen für die oben erwähnten Maße der Aluminiumplatten wären überflüssig. Eine etwas größere oder etwas kleinere Aluminiumplatte würde die Funktion nicht beeinträchtigen. Da die Galvanometerantriebe, wie in der Abbildung 29 zu sehen ist, eingeklemmt werden spielt auch eine etwas größere Ungenauigkeit keine Rolle.

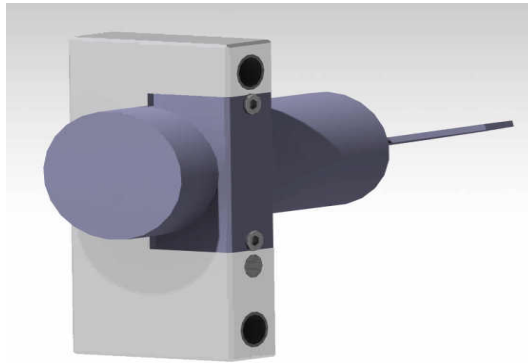


Abbildung 29: Aufnahme des Galvanometerantriebs

Der Galvanometer kann in dieser Öffnung bis maximal 31,5 mm verschoben werden. Dies entspricht genau dem Abstand von der Kante bis zu der Kerbe des Galvanometers, wo der Motor einen kleineren Durchmesser hat – abzüglich der Dicke der Aluminiumplatte (20 mm). Details sind aus der Abbildung 30 ersichtlich.

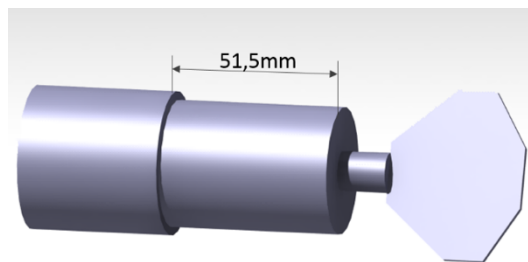


Abbildung 30: Galvanometer

Eigentlich kann auf die Längsverschiebung der Antriebe verzichtet werden, da diese durch die Seitwärtsbewegung des zweiten Antriebes relativiert wird. Um den Galvanometer einklemmen zu können wird ein Bereich um die Öffnung herum ausgeschnitten. Dieser Teil wird mit zwei Schrauben wieder befestigt nachdem der Galvanometer positioniert ist. So eine Konstruktion ermöglicht bei Bedarf einen schnellen Wechsel der Galvanometer ohne die Spiegel abmontieren zu müssen. Dies stellt einen großen Vorteil gegenüber der Variante drei für die Aufnahme der Antriebe dar. Ein weiterer Vorteil ist, dass keine Gefahr besteht, dass die Gleitstangen beim Wechseln der Motoren verbogen oder eingeklemmt werden. Die Gleitstangen sowie die Gewindestange und die Hauptplatte bleiben beim möglichen Austausch des Galvanometers „unberührt“. Dies wäre bei der Variante zwei nicht sichergestellt.

5 Montageanleitung

Es ist wichtig zu wissen, in welcher Reihenfolge die Ablenkeinheit zusammgebaut wird. Die folgenden Abbildungen sollen für die Forscherinnen und Forscher der Firma LZN als Unterstützung dienen. Die Anleitung zur Montage erfolgt nur für eine Seite der Ablenkeinheit. Die anderen beiden Aufhängungen werden analog zusammgebaut. Bei komplizierteren Vorgängen werden die Abbildungen kurz erläutert.

Schritt 1: Aufnahme des Galvanometerantriebs in die Halterung:

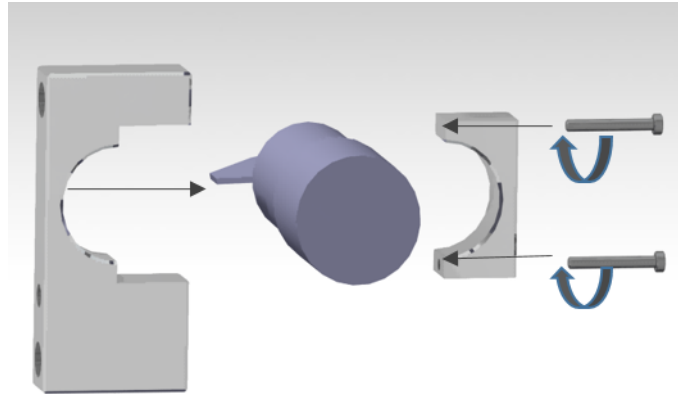


Abbildung 31: Schritt eins

Schritt 2: Einsetzen von Gleitstangen und Gewindestange:

Bevor die Plastikbuchsen eingesetzt werden, wird auf ihre Oberflächen eine Kleberschicht aufgetragen. Die Plastikbuchsen sollen im Aluminiumblock fest verankert sein. Erst dann werden die Gleitstangen eingeführt.

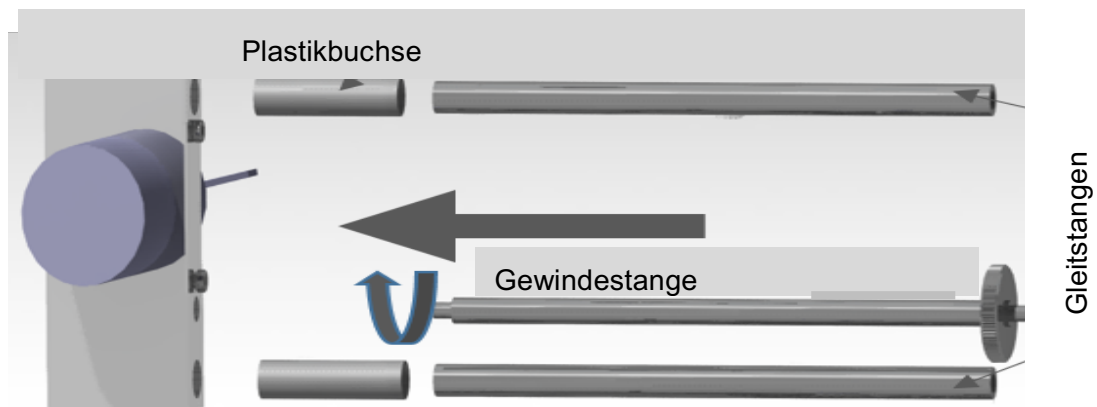


Abbildung 32: Schritt zwei

Schritt 3: Zusammenbauen des Mechanismus:

Die Gleitstangen werden an beiden Enden mit Schrauben fixiert. Für die bessere Fixierung wird auf das Gewinde vorher Loctite (ein industrieller Klebstoff) aufgetragen.

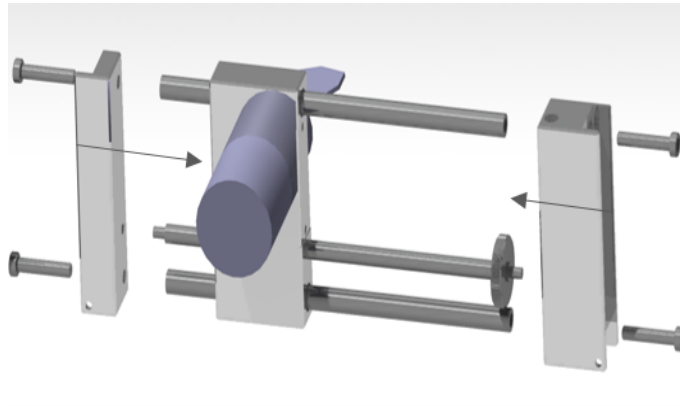


Abbildung 33: Schritt drei

Schritt 4: Die Gewindestange für die vertikale Verschiebung wird eingedreht:

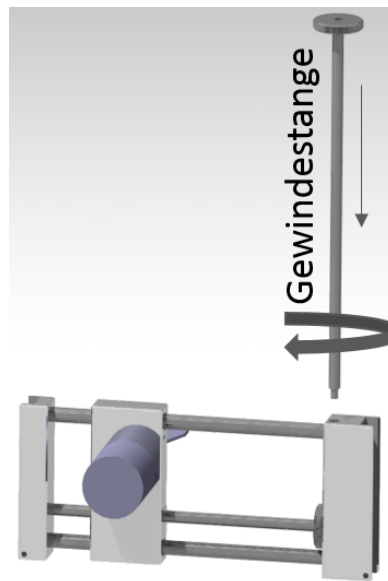


Abbildung 34: Schritt vier

Schritt 5: Plastikbuchsen an den inneren Rahmen anbringen:

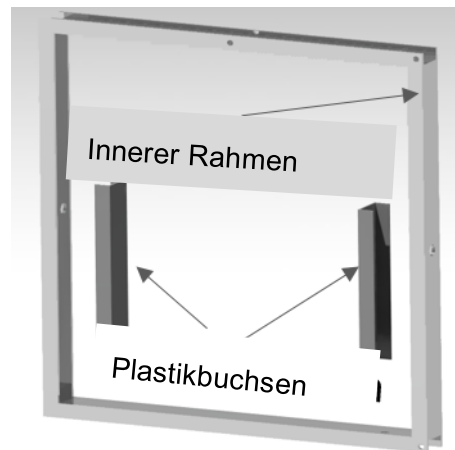
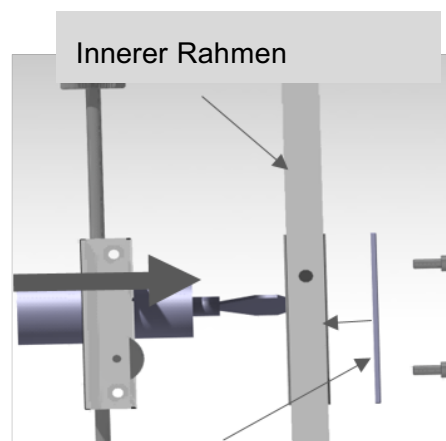


Abbildung 35: Schritt fünf

Schritt 6: Der zusammengebaute Mechanismus wird in den inneren Rahmen platziert und fixiert:

Die Fixierung erfolgt durch das Festschrauben der „Seitenwand des U-Profils“. Vorher wird auch hier auf die Oberfläche der bereits platzierten Plastikbuchsen ein Klebstoff aufgetragen.



Seitenwand U-Profil

Abbildung 36: Schritt sechs

Schritt 7: Fixierung der Gewindestange für die vertikale Verschiebung im inneren Rahmen:

Die Gewindestange wird sowohl unten als auch oben durch Madenschrauben fixiert. Damit die Madenschrauben mit der Stange drehen können ohne sich langsam zu lösen, wird auf des Gewinde Loctite aufgetragen.

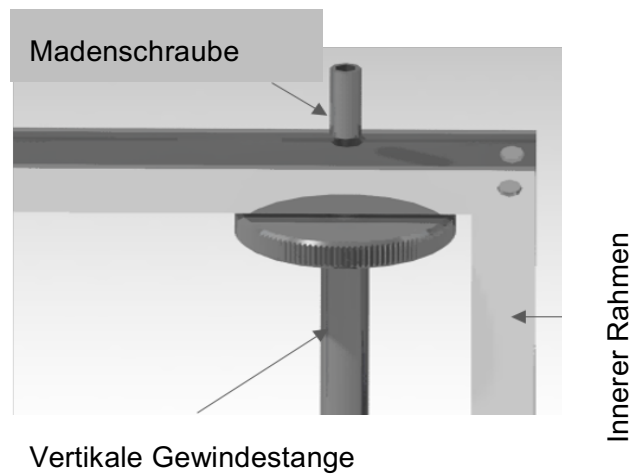


Abbildung 37: Schritt sieben

Schritt 8a: Der innere Rahmen inklusiv alle vorher eingebauten Komponenten wird in den äußeren Rahmen der Kardanaufhängung eingesetzt:

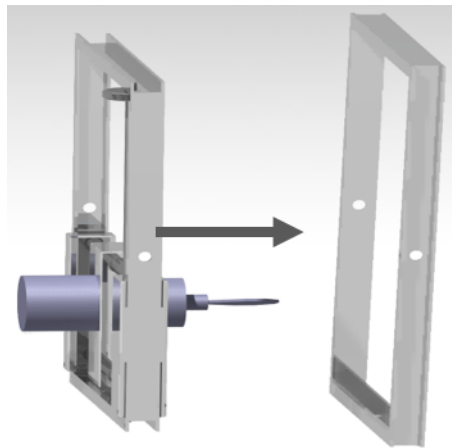


Abbildung 38: Schritt acht (a)

Schritt 8b: Zusammenbauen des Gleitlagers:

Das Gleitlager wird auf beiden Seiten des Rahmens analog zusammengebaut. Damit die Schraube sich mit der Zeit nicht löst, wird auch hier auf das Gewinde der Schraube ein Klebstoff aufgetragen.

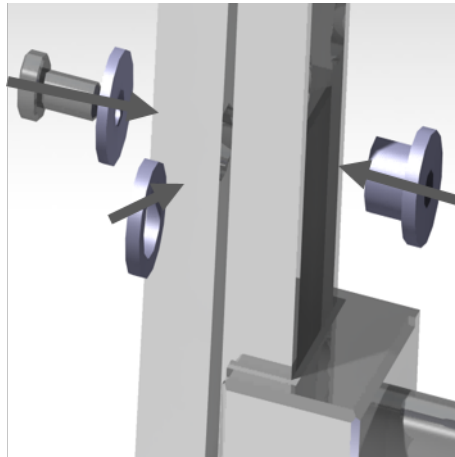


Abbildung 39: Schritt acht (b)

Schritt 9: Zusammenbau des Gehäuses und der Kardanaufhängung:

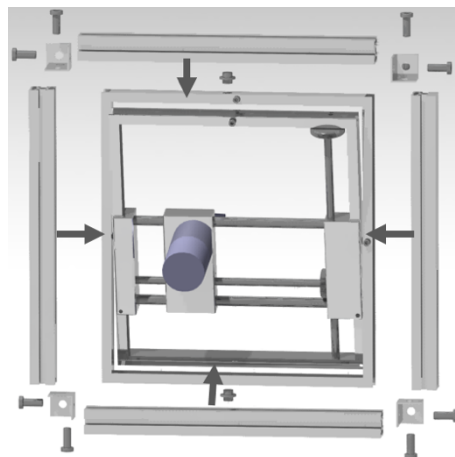


Abbildung 40: Schritt neun

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der vorliegenden Bachelorthesis zusammengefasst und ein Ausblick über eine mögliche Erweiterung oder Verbesserung der Laser-Ablenkeinheit gegeben.

6.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Bachelorthesis wird die Entwicklung einer Ablenkeinheit, die es auf dem Markt in der Form noch nicht gibt, beschrieben. Eingeleitet wird diese Arbeit mit Erläuterungen zur Anwendung der Laser-Remote-Scanner-Technologie. Nachfolgend werden die Aufgabenstellung sowie die den Auftrag gebende Firma vorgestellt. Anschließend wird erläutert, wie es vorgegangen wird, um die komplexen Konstruktionsaufgaben zu bewältigen.

Es gibt viele Hilfsmittel, die die Konstrukteure unterstützen. Ein Beispiel dafür ist die VDI-Richtlinie 2222. Die exakte Vorgehensweise nach der VDI-Richtlinie 2222 minimiert die Gefahr des „Verzetteln“ sowie des Auslassens möglicher guter Lösungen. Den Kern dieser Bachelorarbeit bildet die Ausarbeitung der drei Phasen der Konstruktionsaufgabe: Planen, Konzipieren und Entwerfen.

Die gesamte Konstruktionsaufgabe wird zunächst in vier Teilfunktionen unterteilt. Zwei der Teilfunktionen werden in vier Unterfunktionen weiter spezifiziert. Für jede einzelne Funktion wird nach möglichen Lösungen gesucht. Anschließend werden mit Hilfe des morphologischen Kastens drei Lösungswege ausgewählt, aus denen schließlich ein Konzept vollständig ausgearbeitet wird.

Alle im Lastenheft definierten und gewünschten Anforderungen wurden vollständig erfüllt: Die Konstruktion wiegt knappe 8 kg, die Galvanometerantriebe können einzeln mehr als um 30° gekippt werden. Die Anforderung für das gleichzeitige Kippen der beiden Antriebe von 15° nur um die jeweiligen X-Achsen wurde erfüllt, wenngleich die Umsetzung besondere Lösungswege erforderte. Um das zu ermöglichen wurden die ursprünglich vorgesehenen Maße der Kardanaufhängung so angepasst, dass ein Abstand zwischen dem äußeren Rahmen und dem Gehäuse entstand. Die in der Konstruktion verwendete Kardanaufhängung ermöglicht das gleichzeitige Kippen des Antriebes um die X- und die Z-Achse. Bis zu 5° ist es sogar für beide Motoren gleichzeitig möglich. Die vertikale und die horizontale Verschiebung um +/-50 mm werden sichergestellt. Die Anforderungen „offener Aufbau“ und „einfache Austauschbarkeit der Antriebe“ ließen sich durch die Profilbauweise des Gehäuses leicht realisieren. Alle für diese Konstruktion benötigten Teile sind in der firmeneigenen Werkstatt vorhanden bzw. können dort angefertigt werden. Von daher werden die Kosten für die Fertigung der Ablenkeinheit minimal gehalten.

6.2 Ausblick

Für die Ausarbeitung der Bachelorthesis wurden begrenzte zeitliche und finanzielle Ressourcen zur Verfügung gestellt. Aus diesem Grund wurde die Konstruktion nicht gefertigt. Das bedeutet, dass man nicht am Objekt nachweisen kann, dass alles so funktioniert, wie es gedacht war: Ist das Gehäuse stabil genug? Wird es auch durch die hohen Geschwindigkeiten der Spiegel nicht seine Stabilität verlieren? Oder müsste es in diesem Punkt vielleicht noch verbessert werden, indem z.B. eine weitere Plexiglasscheibe montiert wird? Werden die Verschiebefunktionen funktionieren? Obwohl das Catia V5 Programm virtuelle Tests ermöglicht, weiß man nicht ob der Aluminiumblock zur Aufnahme des Galvanometerantriebes womöglich doch klemmt. Falls die horizontale Verschiebung nicht so funktioniert wie vorgesehen, müssten einige Änderungen durchgeführt werden. Man könnte die Abstände zwischen den Gleitstangen oder die Höhe des Aluminiumblocks vergrößern, damit die Kräfte besser aufgenommen werden. In diesem Fall müsste das ganze Gehäuse samt aller daran hängenden Teile vergrößert werden damit die im Lastenheft festgehaltenen Anforderungen nach wie vor erfüllt werden. Bei einem möglichen Klemmen des Aluminiumblocks könnte man versuchen die Gewindestange so zu positionieren, dass sie genau durch den Schwerpunkt des Aluminiumblocks mit dem eingebauten Antrieb verläuft. Dadurch würden sich die Kräfte gleichmäßiger auf die beiden Gleitstangen verteilen. Um das zu ermöglichen müsste die Geometrie des Aufnahmeblocks geändert werden. Der Block müsste die Form eines Trapezes bekommen. Ähnliche Fragen könnten bei der Funktionalität der Vertikalverschiebung aufgeworfen werden. Obwohl der Aufbau dem eines CD-Laufwerks ähnelt, der offenbar sehr gut funktioniert, könnte es trotzdem zu unerwarteten Hemmungen kommen. Auch hier könnte man die Maße der beiden U-Profile verändern oder sie sogar durch Gleitstangen oder andere Mechanismen ersetzen. Ein weiterer Punkt der getestet werden müsste ist die Gewindestange. Wählt man ein zu feines Gewinde, wird die Positionierung des Antriebes zu viel Zeit in Anspruch nehmen, ein zu grobes Gewinde könnte dahingegen möglicherweise zu Ungenauigkeiten der Ergebnisse führen. Die Funktionalität der Kippfunktion wird am wenigsten angezweifelt, jedoch wäre es gut die fertige Konstruktion zu sehen und zu testen. Möglicherweise lässt sich die Konstruktion die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, im Zuge des Praxistests punktuell verbessern. Dafür wäre mit einem nur geringen zeitlichen Aufwand zu rechnen.

Wie bereits im ersten Kapitel beschrieben, wächst die Bedeutung der Laser-Remote-Technologie in der industriellen Fertigung kontinuierlich. Die Technik muss dabei immer höheren Ansprüchen gerecht werden. Untersuchungen einiger Wissenschaftler zeigen, dass die Laser-Ablenkeinheiten noch Schwachstellen haben. Diese Konstruktion wird die Weiterentwicklung der Laser-Remote-Technologie voranbringen und in naher Zukunft im Hause der Firma LZN zum Einsatz kommen.

7 Literaturverzeichnis

- (20. 09 2016). Von <http://us.123rf.com>:
<http://us.123rf.com/450wm/kulyk/kulyk1503/kulyk150300013/37728006-mikrometer-isoliert-auf-wei--tool-zum-abstand-mit-hoher-genauigkeit-zu-messen-qualitative-vektor-ill.jpg?ver=6> abgerufen
- (20. 09 2016). Von <http://thumbs4.ebaystatic.com>:
<http://thumbs4.ebaystatic.com/d/l225/m/meU9CxtfC7W2aCWgL-fmSng.jpg> abgerufen
- (15. 09 2016). Von <https://65.media.tumblr.com>:
https://65.media.tumblr.com/045e6721cc1216c2addd4aa0c40703fa/tumblr_inlin_e_oba54iEMdw1tqowcc_540.jpg abgerufen
- (15. 09 2016). Von der hydraulik Partner: <https://www.hk-hydraulik.com/de/hydrauliklexikon> abgerufen
- (15. 09 2016). Von der himmlische Höllein:
<http://www.hoelleinshop.com/Zubehoer/Ruderanlenkung/Gewindestangen/Gewindestange-M2x200mm-einseitig-ca-20mm-geschnittenes-Gewinde.htm?shop=hoellein&a=article&ProdNr=RM030775&t=49303&c=21184&p=21184> abgerufen
- (15. 09 2016). Von colourbox: <https://www.colourbox.de/bild/element-of-kettenantrieb-isoliert-auf-weisem-hintergrund-bild-1682084> abgerufen
- (15. 09 2016). Von RC-Netzwoirk.de: http://www.rc-network.de/magazin/artikel_05/art_05-035/art_035-01.html abgerufen
- (15. 09 2016). Von Leschhorn: http://www.leschhorn.de/de/produkte-shop/07_Linear-_u._Positionssysteme/03_Lineartechnik/07_Gleit-,_Rollenfuehrungen abgerufen
- (15. 09 2016). Von MechaPlus: http://www.cnc-modellbau.net/shop/product_info.php?pName=f%FChrungswagen-f%FCr-Ir6-f%FChrungsschiene-komplett&osCsid=8b85f4dccb2b8fa680c3d2d4909850e6 abgerufen
- (15. 09 2016). Von CustomInteractions: <http://www.custom-interactions.com/2016/03/3-gruende-warum-usability-user-experience-nicht-nur-immens-geld-sparen-sondern-auch-bringen/> abgerufen
- Angstenberger, B. (2012). *Fliehkraftunterstütztes Laserbeschichten*. Stuttgart: Utz 2012. ISBN: 3-89675-861-6.
- Beuth. (30. 11 2016). Von <https://www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-2222-blatt-1/1263417> abgerufen
- Branner, F. (2010). *Modellierung transients Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren*. München: Utz 2010. ISBN: 978-3-8316-4071-3.

- EBAY. (16. 09 2016). Von <http://www.ebay.de/itm/Kugelgelenk-Kugelkopf-Kugelauge-Schaltgestaenge-Schaltung-fuer-Harley-Davidson-/151180203547> abgerufen
- Froschmeier-Hanss, T. (2013). *Laser in der Materialbearbeitung Forschungsberichte des IFSW*. Herbert Utz Verlag GmbH, München.
- Fuhrland, M. (2008). *Konzeption und Umsetzung neuer Technologien zur biaxialen Winkelmessung und elektrooptischen Pseudostreckenmessung*. München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission beim Verlag C. H. Beck.
- Hafez, M., Sidler, T., & Salathe´, R.-P. (2002). *Study of the beam path distortion profiles generated by a two-axis tilt single-mirror laser scanner*.
- Hornfeck, F. (2008). *Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie*. München: Utz 2008. ISBN: 9783831608263.
- <http://previews.123rf.com>. (20. 09 2016). Von <http://previews.123rf.com/images/kulyk/kulyk1401/kulyk140100054/25359016-Vernier-Bremssattel-auf-wei-em-Tool-um-Abstand-mit-hoher-Genauigkeit-messen-Lizenzfreie-Bilder.jpg> abgerufen
- <http://www.arthrovitan.de>. (20. 09 2016). Von <http://www.arthrovitan.de/unsere-gelenke/gelenkformen/> abgerufen
- JungheinrichProfishop*. (20. 09 2016). Von <http://www.jh-profishop.de/Arretierung-fuer-fahrbare-Werkbaenke-31890-148525/> abgerufen
- Karl-Heinz Schlot. (2002). *Chronologie der Wissenschaften*.
- KidsScience*. (21. 09 2016). Von <http://www.kids-and-science.de/wie-funktioniert/detailansicht/datum/2009/11/04/wie-funktioniert-ein-cd-player.html> abgerufen
- Lütke, M. (2011). *Entwicklung des Remote-Laserstrahlschneidens metallischer Werkstoffe*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. ISBN: 9783839603598. .
- Laser Community*. (2016). Abgerufen am 30. 08 2016 von <http://laser-vommunity.com/de/der-laser-spricht-chinesisch/>
- Laser Technik Journal. (2013). *Laserstrahl-Remoteschweißen*. (W. 2013 WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, Hrsg.) *Laser Technik Journal*(4/2013), 28-29.
- Londig, O., & Pannhorst, W. (1985). *Thermal expansion and length stability of Zerodur in dependence on temperature and time*.
- LZN. (kein Datum). Abgerufen am 01. 09 2016 von www.lzn-hamburg.de.
- LZN. (2016). [lzn-hamburg.de](http://www.lzn-hamburg.de/ueber-uns.html). Abgerufen am 30. 08 2016 von <http://www.lzn-hamburg.de/ueber-uns.html>

- Mankenberg*. (20. 09 2016). Von <http://www.mankenberg.de/de/133/produktuebersicht.html> abgerufen
- NORELEM*. (15. 09 2016). Von <http://www.norelem.de/de/de/Produkte/Produkt%C3%BCbersicht/Systeme-Komponenten-Maschinenbau-Anlagenbau/Schlittenf%C3%BChrungen-F%C3%BChrungsschienen-Positioniertische-Miniaturlauf%C3%BChrungen-Positionsanzeiger/Schlittenf%C3%BChrungen/Schwalbenschwanz-S> abgerufen
- PresseClicker*. (20. 09 2016). Von <http://presseclicker.produkt-pr.de/2013/09/04/preis-und-leistung-ueberzeugen-neuer-hexapod-h-820-positioniert-lasten-bis-20-kg-in-sechs-achsen/> abgerufen
- RAYLASE*. (2016). *www.raylase.de*. Abgerufen am 01. 09 2016 von http://raylase.de/fileadmin/downloads/public/raylase_uhss_de.pdf
- Rexrout Bosch Group*. (16. 09 2016). Von <https://www.boschrexroth.com/de/de/produkte/produktgruppen/montagetechnik/mechanik-grundelemente/index> abgerufen
- Rolof/Matek Maschinenelemente*. (kein Datum). Springer.
- Scanlab*. (28. 09 2016). Von <http://www.scanlab.de/produkte/scan-systeme/intellidrill> abgerufen
- Scanlab*. (22. 11 2016). Von <http://www.scanlab.de/applikationen/laser-welding> abgerufen
- Schröder, A. (19. 09 2016). <https://axel-schroeder.de>. Von <https://axel-schroeder.de/morphologische-matrix-eine-kreativitaetstechnik-fur-produktinnovationen-von-unternehmern/> abgerufen
- Schröder, G. (1990). *Technische Optik: Grundlagen und Anwendungen*. Würzburg: Vogel Verlag.
- Schweier, M. (2015). *Simulative und experimentelle Untersuchungen zum Laserschweißen mit Strahloszillation*. Doktorarbeit, München.
- Sovetchenko, P. (2007). *Herstellung beschichteter Mehrblechverbindungen im Karosseriebau mit Hilfe der Hochleistungslasertechnik*. Magdeburg: Aachen: Shaker 2007. ISBN: 9783832261061.
- Spektrum.de*. (15. 09 2016). Von <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/kardanische-aufhaengung/7800> abgerufen
- Standfuß, J. (1999). *Zur Dauerschwingfestigkeit von laserstrahlgehärteten Vergütungsstählen*. Dresden: Fraunhofer-Verlag 1999. ISBN: 9783816752561.
- Tamawa*. (20. 09 2016). Von <http://www.tamawa.eu/> abgerufen
- teleskopschienen24*. (20. 09 2016). Von <http://www.teleskopschienen24.de> abgerufen

- TentenBoats*. (20. 09 2016). Von <https://tenten-boats.de/Rohrgelenk-180-mit-Kugelsperrbolzen-aus-Edelstahl-fuer-Bimini-Top-Verdecke> abgerufen
- thorlabs*. (28. 09 2016). Von https://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_ID=3770 abgerufen
- Treiber, H. (1982). *Lasertechnik*.
- Trumpf*. (22. 11 2016). Von <http://www.trumpf-laser.com/de/loesungen/anwendungsfelder/laserschweissen/scannerschweissen.html> abgerufen
- VON.JAN TECHNOLOGY*. (31. 10 2016). Von <http://www.vonjantech.de/de/ablenkeinheit.html> abgerufen
- www.ch-forrer.ch*. (22. 09 2016). Von <http://www.ch-forrer.ch/Modellflug/Tipps/Schrauben/Schraubverbindungen.htm> abgerufen
- www.fertigungsverfahren48.de/*. (16. 09 2016). Von <http://www.fertigungsverfahren48.de/> abgerufen