



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Melanie Zilch

Konzeptentwicklung und Konstruktion einer Girderjustiereinheit für DL- Ablenkmagnete

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Melanie Zilch

**Konzeptentwicklung und Konstruktion
einer Girderjustiereinheit für DL-
Ablenkmagnete**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau / Entwicklung und Konstruktion
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY
Zentrale Konstruktion ZM1
Notkestraße 85
22607 Hamburg

Erstprüfer/in: Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Helmut Schäfer
Zweitprüfer/in: Dipl.-Ing. Cornelius Martens

Abgabedatum: 19.11.2021

Zusammenfassung

Melanie Zilch

Thema der Bachelorthesis

Konzeptentwicklung und Konstruktion einer Girderjustiereinheit für DL-Ablenkmagnete

Stichworte

Girderjustiereinheit, DL-Ablenkmagnete, Methodische Produktentwicklung, Konstruktion, FEM-Analyse,

Kurzzusammenfassung

Diese Bachelorthesis umfasst die methodische Konstruktion einer Girderjustiereinheit für DL-Ablenkmagnete. Anhand der methodischen Produktentwicklung werden Funktion, Anforderungserfassung sowie Konzept und Gestaltung verdeutlicht und zielorientiert durchgeführt. Mit Hilfe der FEM-Analyse wird der Nachweis der statischen und dynamischen Steifigkeit sowie der Eigenfrequenzen erbracht.

Melanie Zilch

Title of the paper

Concept development and construction of a girder adjustment unit for DL deflecting magnets

Keywords

Girder adjustment unit, DL deflecting magnets, methodical product development, construction, FEM analysis

Abstract

This bachelor thesis describes the methodical construction of a girder adjustment unit for DL deflecting magnets. On the basis of the methodical product development, function, recording of requirements as well as concept and design should be clarified and carried out in a target-oriented manner. A calculation method such as FEM analysis should be used to verify the static and dynamic stiffness as well as the natural frequencies.

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all denjenigen bedanken, die mich während meiner Anfertigung dieser Bachelorthesis unterstützt haben.

Vorerst möchte ich mich bei meinem Erstprüfer Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Helmut Schäfer und meinem Zweitprüfer Herrn Dipl.-Ing. Cornelius Martens herzlich für die Betreuung und Unterstützung bei der Erstellung meiner Bachelorthesis bedanken.

Ebenfalls möchte ich einen weiteren Dank an Martin Lemke, Roland Platzer und besonders an Torsten Ramm und Jutta Bentien, aussprechen, die mir von Beginn an bei der Gestaltung dieser Thesis zur Seite und bei Fragen jederzeit zur Verfügung standen.

Des Weiteren bedanke ich mich bei allen anderen Kollegen aus der Abteilung ZM1, die mich bei Fragen stets unterstützt haben.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Freunden und meiner Familie bedanken, die während des Studiums für mich da waren und Verständnis aufgebracht haben. Vielen Dank dafür!



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Maschinenbau und Produktion

Aufgabenstellung

für die Bachelorthesis

von Frau Melanie Zilch

Thema: Konzeptentwicklung und Konstruktion einer Girderjustiereinheit für DL-Ablenkmagnete

Die Bachelorthesis wird im Rahmen des dualen Studiums am Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg in der Zentralen Konstruktion ZM1 absolviert.

Das DESY ist derzeit eines der größten Forschungszentren in Deutschland, welches der HelmholtzGemeinschaft angehört. Durch die Entwicklung und den Bau von Beschleunigeranlagen sowie Nachweisinstrumenten, zählt DESY zu den weltweit führenden Beschleunigerzentren. Die Schwerpunkte der Forschung umfassen die Entwicklung und den Bau von Beschleunigern, die Forschung mit Photonen sowie die Teilchen- und Astroteilchenphysik.

Eine der weltweit bedeutendsten Synchrotronquellen ist der auf dem Gelände befindliche PETRA III Speicherring. Zur Erhöhung der Auflösung soll dieser in den nächsten Jahren als 3D-Röntgenquelle komplett umgebaut und erweitert werden (PETRA IV). Vorhandene Beschleuniger werden erweitert und Magnetstrukturen werden umfangreich ersetzt werden. Dipolmagnete sind für die Ablenkung des Elektronenstrahls in dem Speicherring verantwortlich.

Die Girderaufstellung für die Justierung der DL-Ablenkmagnete (Permanent magnet dipoles with longitudinal gradient) soll künftig im Speicherring PETRA IV (Speicherring- Röntgenstrahlungsquelle) zum Einsatz kommen. Auf dem Girder befindet sich die Permanentmagnetstruktur, die aus jeweils fünf

Dipolen unterschiedlicher Länge besteht (Abb.1). Sie werden in allen Segmenten des Speicherrings dort eingesetzt, wo der Elektronenstrahl im Synchrotron umgelenkt werden muss. Die Justierung der Girderereinheit soll über motorisch angetriebene Verstelleinheiten und einem RemoteControl-System geschehen.

Die Aufgabe der Bachelorthesis ist die methodische Konstruktion der Girderjustiereinheit.

Dabei sollen die wesentlichen Schritte der methodischen Produktentwicklung erkennbar werden (Funktion, Anforderungserfassung, Konzept, Gestaltung). Die Anforderungen an eine hohe statische und dynamische Steifigkeit (niedrige Eigenfrequenz) sind besonders zu beachten. Hierfür dürfen Berechnungsmethoden, wie die FEM-Analyse, zum Einsatz kommen. Aufgrund der relativen großen Anzahl der Girder (384 oder 432 Stück) sind Anforderungen der Serienfertigung und Montage bei der Gestaltung zu berücksichtigen.

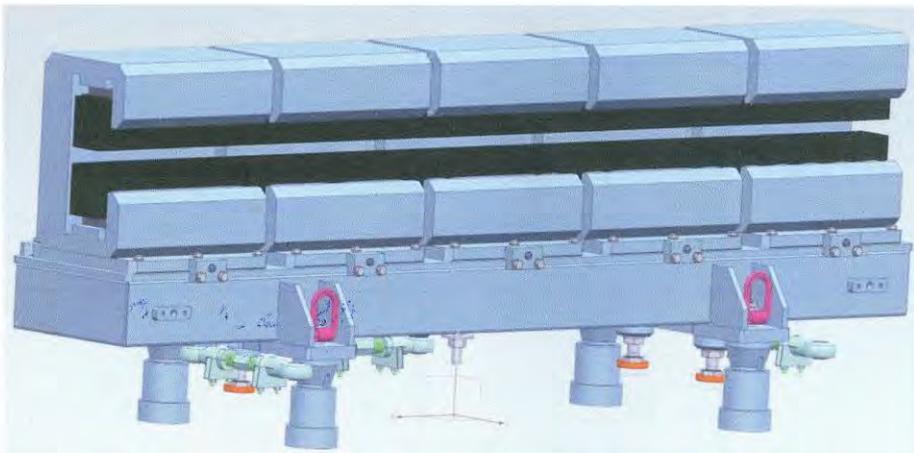


Abbildung 1: 3D-Modell der Girderjustiereinheit mit den DL-Ablenkmagneten

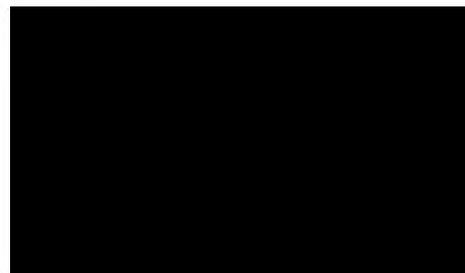
Schwerpunkte:

Produktentwicklung

Methodisches Konstruieren

Finite Element Methode

30.06.2021
Datum



Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	X
Abbildungsverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
1.1 Vorstellung des Unternehmens.....	1
1.2 Motivation und Aufgabenstellung	2
2 Stand der Technik	4
2.1 DL-Ablenkmagnet.....	5
2.2 Justiereinheit-Lenkergestell	7
2.3 Weitere Justiereinheiten	9
2.3.1 EASy	9
2.3.2 Exzentrische Rolle - Micromover	11
2.3.3 Keilsysteme	12
2.3.4 Gestapeltes Linearachsensystem	12
3 Konzeptentwicklung	14
3.1 Funktionsbeschreibung.....	14
3.2 Anforderungsliste.....	14
3.3 Morphologischer Kasten	16
3.4 Lösungsbewertung	18
3.5 Rangfolgegewichtung	19
3.6 Wertigkeitsverfahren.....	21
3.7 Begründete Auswahl der Lösungsvariante.....	23
4 Konstruktion	25
4.1 Justiereinheit	25
4.1.1 Elevationsbasis.....	26
4.1.2 Kreuztisch.....	33
4.1.3 Rotationsplatte.....	36
4.1.4 Montage der Platten nach der Justage	37

4.2	Lineareinheit.....	39
5	FEM-Analyse	41
5.1	Statisch-mechanische Analyse	41
5.1.1	Netzstudie	44
5.1.2	Auftretende Verformungen an der Justiereinheit.....	46
5.1.3	Auftretende Spannungen.....	49
5.2	Modalanalyse	51
6	Zusammenfassung	55
7	Ausblick	56
	Literatur- und Quellenverzeichnis	57
	Anhang	61
	Eidesstattliche Erklärung	81

Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit
Rot_x	Drehung um die Längsachse	
Rot_y	Drehung um die Querachse	
Rot_z	Drehung um die Hochachse	
X	Verschiebung längs zum Strahl	
Y	Verschiebung quer zum Strahl	
Z	Höheneinstellung	
g	Erdbeschleunigung	$\frac{m}{s^2}$

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
DESY	Deutsches Elektronen-Synchrotron
EASy	Easy Alignment System
FEM	Finite-Element-Methode
Pi	Punktzahlen
gi	Gewichtungsfaktor

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anforderungsliste der Girderjustiereinheit [4]	16
Tabelle 2: Lösungsbewertung	19
Tabelle 3: Wertigkeitsverfahren	22
Tabelle 4: verschiedene Elementgrößen und deren zugehörige Verformung	44
Tabelle 5: Abweichungen zwischen den Varianten	46
Tabelle 6: Eigenfrequenzen der Justiereinheit	51
Tabelle 7: Eigenfrequenzen der Justiereinheit mit montierter Magnetstruktur	53

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gelände des Forschungszentrums und dessen Beschleunigeranlagen [2].....	1
Abbildung 2: Darstellung der Emittanz (Strahlausbreitung) des Elektronenstrahls bei Verwendung eines einzelnen Magneten b) und mehrerer Magnete c) [5].....	2
Abbildung 3: Anordnung der DL-Permanentmagnetstrukturen innerhalb einer Zelle [6]	3
Abbildung 4: 3D-Modell der Lenkerjustiereinheit mit montierter DL-Magnetaufstellung [7]	4
Abbildung 5: Skizze eines Magnetquerschnitts	5
Abbildung 6: 3D-Modell einer Magnetstruktur [7]	6
Abbildung 7: Vereinfachte Darstellung eines Moduls mit schrägen Polflächen [7].....	6
Abbildung 8: Lenkergestell M12	7
Abbildung 9: Freiheitsgrade des Lenkergestells (in Anlehnung an [7])	8
Abbildung 10: Kennzeichnung der Lenker und Stellschrauben, um Freiheitsgrade zu ermöglichen [7]	9
Abbildung 11: Zukünftige Entwicklung unterschiedlicher Baugrößen des EASy's [10].....	9
Abbildung 12: EASy A3 [13].....	10
Abbildung 13: Exzentrische Rolle [4].....	11
Abbildung 14: Skizze einer exzentrischen Rolle	11
Abbildung 15: Präzisionsnivellierkeil der Bauform DK-2 [15]	12
Abbildung 16: Gestapelte Linearachsen [10].....	13
Abbildung 17: Morphologischer Kasten [18-25].....	17
Abbildung 18: Lösungsvarianten [18-25].....	18
Abbildung 19: Rangfolge-Gewichtung (gi).....	20
Abbildung 20: Lösungsvariante 2	24
Abbildung 21: CAD-Modell der Girderjustiereinheit	25
Abbildung 22: Justiereinheit mit Darstellung der Freiheitsgrade	25
Abbildung 23: Modularer Aufbau der Justiereinheit.....	26
Abbildung 24: Elevationsbasis	27
Abbildung 25: Darstellung des Keilprinzips	28
Abbildung 26: Federstempel	28
Abbildung 27: Motorische Antriebseinheit [30]	29
Abbildung 28: Variante 1 der Buchse	29
Abbildung 29: Schnittansicht der Variante 1	29
Abbildung 30: Schnittansicht der Variante 2	30
Abbildung 31: Ansicht der Variante 3	30
Abbildung 32: Aufstellvariante 1 der Stempel und Legende	31
Abbildung 33: Stempelanordnung in der Aufstellvariante 2	32
Abbildung 34: Stempelanordnung in der Aufstellvariante 3	33

Abbildung 35: Longitudinalplatte mit Bewegungsrichtungen der Nutensteine.....	34
Abbildung 36: Schnittdarstellung der Antriebseinheit innerhalb der Longitudinalplatte	34
Abbildung 37: Schnittdarstellung des Nutensteins zur longitudinalen Bewegungsführung ...	34
Abbildung 38: Transversalplatte mit Bewegungsrichtung der Nutensteine	35
Abbildung 39: Antriebseinheit der transversalen Verschiebung.....	35
Abbildung 40: Nutenstein zur Führung der Transversalplatte mit Endlagen	36
Abbildung 41: Rotationsplatte mit Bewegungsrichtung der Nutensteine.....	36
Abbildung 42: Schnittansicht des Hardstops	37
Abbildung 43: Hardstop	37
Abbildung 44: Draufsicht der Girderjustiereinheit	37
Abbildung 45: Verschraubung der Rotations- und Transversalplatte.....	37
Abbildung 46: Schnittansicht der Verschraubung der Rotations-, Transversal- und Longitudinalplatte.....	38
Abbildung 47: Darstellung der Verschraubung von Longitudinal- und Elevationsplatte	38
Abbildung 48: Lineareinheit.....	39
Abbildung 49: Endlagenerfassung über Schraube und Mutter	40
Abbildung 50: Vereinfachtes CAD-Modell der Girderjustiereinheit.....	42
Abbildung 51: Darstellung der Buchse vor und nach der Vereinfachung	42
Abbildung 52: Vergleich der Netzstruktur der Buchse vor und nach der Vereinfachung	42
Abbildung 53: Werkstoffzuweisung der Girderjustiereinheit.....	43
Abbildung 54: Darstellung der Randbedingungen und angreifenden Kraft	44
Abbildung 55: Vernetzung der Platten mit einer Elementgröße von 30 mm.....	45
Abbildung 56: Verformung mit einer Vernetzung mit einer Elementgröße von 30 mm.....	45
Abbildung 57: Netzstudie – Verformung in Abhängigkeit der Elementgröße	46
Abbildung 58: Verformungen bei einer Vernetzung mit einer Elementgröße von 10 mm.....	47
Abbildung 59: Darstellung der Verformung in Richtung Z-Achse.....	47
Abbildung 60: Optimierte Verformung bei Verschiebung der Stempel um 15 mm und erneut mögliche Verschiebung der Stempelposition	48
Abbildung 61: Justiereinheit mit integrierter Magnetstruktur	49
Abbildung 62: Verformung der Platten der Justiereinheit nach Hinzukommen der Magnetstruktur.....	49
Abbildung 63: Auftretende Spannungen in der Justiereinheit unter Last der Magnetstruktur	50
Abbildung 64: Maximale Verformung an der Buchse	50
Abbildung 65: Vorderansicht der Eigenform der ersten Eigenfrequenz von 454,49 Hz.....	52
Abbildung 66: Eigenform der ersten Eigenfrequenz von 454,49 Hz	52
Abbildung 67: Seitenansicht der Eigenform der ersten Eigenfrequenz von 159,88 Hz	54
Abbildung 68: Draufsicht der Eigenform der ersten Eigenfrequenz mit 159,88 Hz	54

1 Einleitung

1.1 Vorstellung des Unternehmens

Das Deutsche Elektronen-Synchrotron (DESY) wurde am 18. Dezember 1959 in Hamburg gegründet und ist Teil der Helmholtz-Gemeinschaft. Neben dem Standort in Hamburg befindet sich ein zusätzlicher in Zeuthen (Brandenburg). Insgesamt sind am DESY etwa 2700 Mitarbeiter /-innen beschäftigt und über 3000 Gastforscher /-innen aus über 40 Nationen finden sich jährlich in einem der größten Forschungszentren in Deutschland ein. Durch die Entwicklung und den Bau von Beschleunigern sowie Nachweisinstrumenten zählt DESY zu den weltweit führenden Beschleunigerzentren. Die Schwerpunkte der Forschung umfassen die Entwicklung und den Bau von Beschleunigern, die Forschung mit Photonen sowie Teilchen- und Astroteilchenphysik. [1]

In der folgenden Abbildung 1 ist das Gelände des Forschungszentrums und dessen Beschleunigeranlagen dargestellt.



Abbildung 1: Gelände des Forschungszentrums und dessen Beschleunigeranlagen [2]

1.2 Motivation und Aufgabenstellung

Das DESY betreibt mit dem Beschleuniger PETRA III eine der brilliantesten Speicherring-Röntgenstrahlungsquellen weltweit. Mit dieser Beschleunigeranlage wird eine beachtliche Röntgenstrahlung durch gebündelte Elektronen erreicht, die einen intensiven Photonenstrahl erzeugen. Wissenschaftler /-innen aus verschiedensten Fachgebieten (wie z.B. der Physik, Chemie, Geo- und Materialwissenschaften, der Medizin oder Molekularbiologie) nutzen das Röntgenlicht, um vielfältige, strukturelle Untersuchungen auf molekularer oder atomarer Skala durchzuführen. [3, 4]

Durch den zukünftigen Umbau von PETRA soll die Leuchtdichte ("Brillanz") der Strahlungsquelle um mehrere Größenordnungen gesteigert werden. Dies wird als eine Art 3D-Röntgenmikroskop betrachtet. Bei diesem Komplettumbau des gesamten Beschleunigers wird die Magnetanordnung so geändert werden, dass jeder der bisherigen Ablenkmagnete (Dipole) durch mehrere, dafür schwächere Dipole ersetzt wird, zwischen denen noch zusätzliche Fokussiermagnete platziert werden. Dies führt zu einer kontinuierlicheren Ablenkung des Elektronenstrahls, der dadurch eine kleinere Ausdehnung (in Größe und Winkel) behalten kann (Abbildung 2). Die emittierte Strahlung besitzt somit schließlich eine höhere Leuchtdichte. Weiterhin sollen die Ablenkmagnete nicht mehr als Elektromagnete, sondern in Permanentmagnettechnologie gebaut werden. [4]

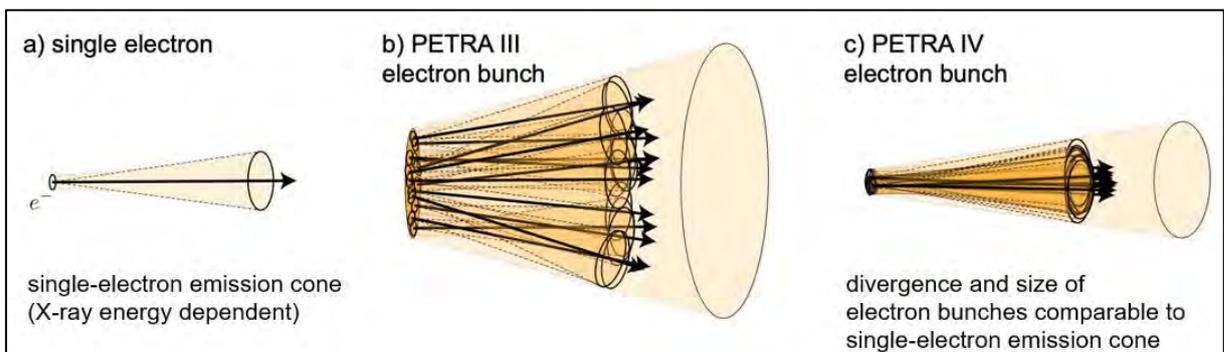


Abbildung 2: Darstellung der Emittanz (Strahlausbreitung) des Elektronenstrahls bei Verwendung eines einzelnen Magneten b) und mehrerer Magnete c) [5]

2 Stand der Technik

Bis zum jetzigen Zeitpunkt wurde auf dem Lenkerjustiersystem (Abbildung 4, untere Einheit) ein einzelner Magnet zur Umlenkung montiert. In der Abbildung 4 wird der aktuelle Entwurf der DL-Magnetstruktur mit der integrierten Lenkerjustiereinheit gezeigt. Die Länge der Baugruppe beträgt an der Außenseite der Permanentmagnete 1502 mm. Die Breite der Außenflächen bei den Tragösen beträgt 420 mm und die Höhe von den drei Justierfüßen (Stellschrauben) bis hin zur Oberseite der Magnete 515 mm. In der weiteren Entwicklungsphase wird sich durch Hinzufügung des Verschiebemechanismus zum Ausheizen der Vakuumkammer die Breite sowie die Höhe verändern.

Die Abbildung 4 wurde in Anlehnung an [7] erstellt.

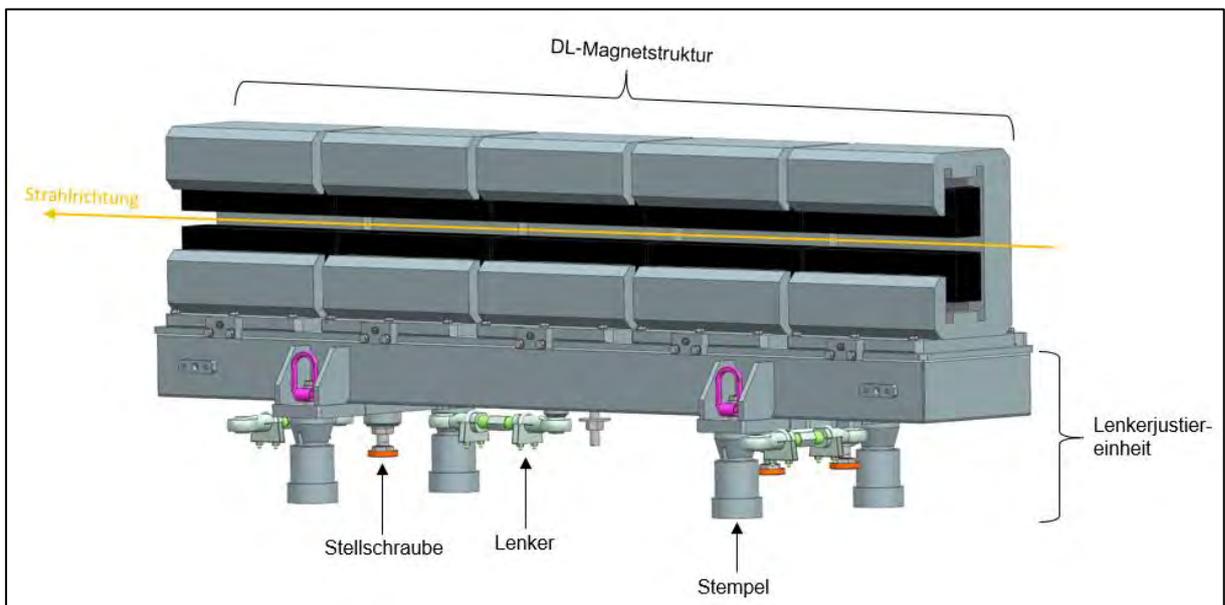


Abbildung 4: 3D-Modell der Lenkerjustiereinheit mit montierter DL-Magnetaufstellung [7]

Nach jetzigem Stand soll die Justiereinheit über vier Stempel mit dem Sockel verklebt werden. Realisierbar ist dieser Ansatz nur unter dem Aspekt, dass der Verfahrensweg für die Positionierung der Magnetstruktur sowie das seitliche Herausfahren um 200 mm – 300 mm der gesamten Girderjustiereinheit für das Ausheizen der Vakuumkammer sichergestellt wird. Dies ist von hoher Relevanz, da bei zu geringem Raum zwischen Permanentmagnet und Vakuumkammer die Magnete durch den unerwünschten Wärmeeintrag entmagnetisiert werden könnten. Die Justierung geschieht zurzeit manuell über ein Regelgewinde, wodurch Positionen im Zehntel-Millimeter-Bereich erreichbar sind. Die Aufstellgenauigkeit, die bei der Positionierung erreicht werden soll, muss jedoch mindestens 20 µm quer zum Strahl betragen.

Die erste Eigenfrequenz der Baugruppe (Abbildung 4) befindet sich bei etwa 82 Hz, welche im Idealfall bei mindestens 100 Hz liegen soll. Die Vakuumrohre werden zwischen der Außenseite der Magnetaufstellung und der Tunnelwand gestützt.

Der Photonenstrahl soll dabei etwa 500 mm von der Tunnelwand entfernt sein. Die Zugänglichkeit der DL-Ablenkmagnete wird folglich von der Ringinnenseite ermöglicht. Des Weiteren dürfen in einem Radius von ca. 170 mm rund um den Strahl sowie direkt unterhalb des Magneten keine magnetischen Materialien verwendet werden, da hierdurch das Magnetfeld und somit der Photonenstrahl beeinflusst würden. Die Verwendung magnetischer Materialien ist nur möglich, wenn ein gewisser Abstand zum Magneten eingehalten wird. Dieser muss mindestens so groß sein wie der Abstand zwischen Joch und Pol (Abbildung 5). Aufgrund gegebener Anforderungen (siehe Kapitel 3.2) soll in Zukunft ein hochpräzises Justiersystem in Betracht gezogen werden. [4]

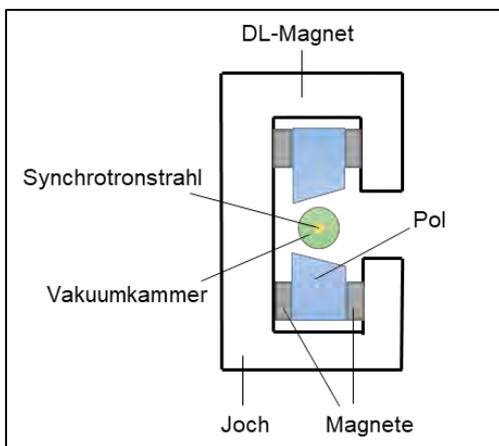


Abbildung 5: Skizze eines Magnetquerschnitts

2.1 DL-Ablenkmagnet

Zum Ablenken des Elektronenstrahls können entweder Elektro- oder Permanentmagnete verwendet werden. Für den geplanten Umbau sind Permanentmagnete vorgesehen. Sie befinden sich in jeder Zelle und sind mechanisch gleich aufgebaut. Die Idee ist, die DL-Magnetstruktur aus fünf einzelnen Modulen aufzubauen. Die Module innerhalb einer DL-Magnetstruktur werden zudem in einem bestimmten Winkel zueinander montiert. Die Magnetstruktur soll sowohl in Längs- als auch in Querrichtung justierbar sein, um den Synchrotronstrahl präzise ablenken zu können. Durch die magnetische Vermessung sollen die Module zueinander komplett ausgerichtet werden, sodass im Betrieb nur noch die komplette Justiereinheit eingestellt werden muss. Lediglich im Einzelfall soll ein Nachstellen der einzelnen Module möglich sein. Aufgrund der unterschiedlichen Feldamplituden der einzelnen Module, besitzt jede Magnetstruktur ein sich änderndes Feld quer zur Strahlrichtung. Für eine

optimierte Elektronenstrahleigenschaft bedarf es eines bestimmten Feldes, wodurch jeweils jedes Modul einen unterschiedlichen Füllfaktor an Magnete aufweist (Abbildung 6). Bei der Justage muss für die Ablenkung das Dipolfeld der Dipolmagnete mit einer Abweichung von etwa $5 \cdot 10^{-4}$ T erreicht werden. Um dieses zu erreichen, muss die transversale Position auf $20 \mu\text{m}$ genau erzielt werden. [4]

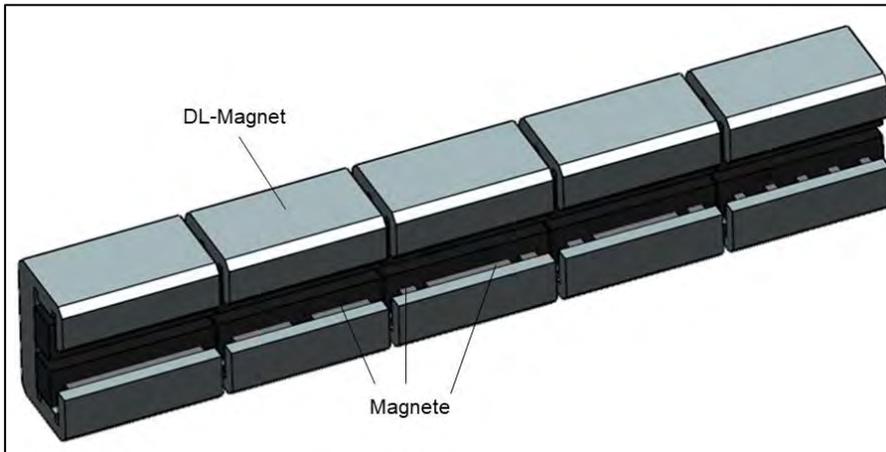


Abbildung 6: 3D-Modell einer Magnetstruktur [7]

In der nachfolgenden Abbildung 7 ist der vereinfachte Querschnitt eines Moduls dargestellt. Anhand dessen soll veranschaulicht werden, dass sowohl ein Dipol- als auch Quadrupolanteil verwendet wird. Durch diese Kombination können zwei Eigenschaften zeitgleich ausgeführt werden. Zum einen entsteht durch die parallel zueinander angeordneten Polflächen (in dieser vereinfachten Darstellung nicht aufgezeigt) ein homogenes Magnetfeld (Dipol), wodurch der Synchrotronstrahl radial abgelenkt wird. Zum anderen führt die schräge Anordnung zu einem inhomogenen Magnetfeld (Quadrupol), wodurch der Strahl zugleich auf seiner Bahn fokussiert werden kann. Das Zusammenspiel beider Charakteristika ist für die transversale Positionierung relevant und muss folglich eingehalten werden. [8, 9]

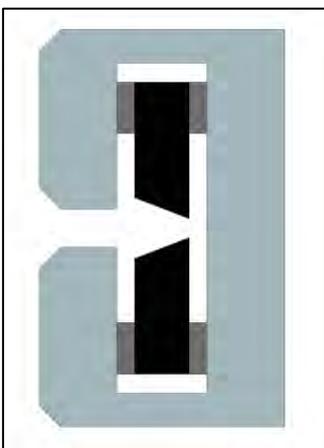


Abbildung 7: Vereinfachte Darstellung eines Moduls mit schrägen Polflächen [7]

Der Hauptgrund für den Einsatz von Permanentmagneten anstelle von Elektromagneten ist der geringe Bauraum. Ein Permanentmagnet besitzt eine höhere Energiedichte als eine Spule. Um dieselbe Leistung erzielen zu können, müsste die Spule daher mit größeren Abmaßen hergestellt werden, wodurch mehr Bauraum benötigt wird. Da der Abstand der Magnete nur wenige Zentimeter beträgt, ist die Baugröße hier entscheidend. Ein weiterer Unterpunkt sind die ausbleibenden Betriebskosten, da Permanentmagnete ohne Einwirkung von Strom ein Magnetfeld erzeugen. Das zieht wiederum auch einen Nachteil mit sich: Das magnetische Feld und somit die Leistung der Permanentmagnete für individuelle Betriebszustände kann nicht geregelt werden, wodurch die wiederkehrenden Investitionskosten gegenüber den Elektromagneten höher sind. Ein weiterer Vorteil ist, dass Permanentmagnete im Vergleich zu Elektromagneten keine Wärme abgeben. Dies ist aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Tunnelsegmente ein wesentlicher Faktor, der zu berücksichtigen ist. [4]

2.2 Justiereinheit-Lenkergestell

Für die Positionierung der Magnetaufstellung wird zurzeit ein Lenkergestell mit einer manuellen Justierung angedacht. Ein motorischer Antrieb ist nicht möglich. In der Abbildung 8 wird eine solche Justiereinheit der Baugröße „M12“ dargestellt. Die Abmaße betragen in etwa 330 mm x 600 mm x 130 mm. Das Lenkergestell weist zudem eine Tragfähigkeit von 2000 kg sowie eine Nachgiebigkeit von rund 17 $\mu\text{m}/\text{N}$ auf. Der Verfahrensweg der Justiereinheit beläuft sich auf eine Strecke von $\pm 12,5$ mm und gewährleistet eine Positionsgenauigkeit von 100 μm . [10, 11]



Abbildung 8: Lenkergestell M12

Nachfolgend wird das eingesetzte Lenkergestell als CAD-Modell dargestellt. Das Positioniersystem besitzt sechs Freiheitsgrade (Abbildung 9), die anhand der Stellschrauben und Lenker ermöglicht werden können (Abbildung 10). Es gibt jeweils neben drei rotatorischen auch drei translatorische Freiheitsgrade. Die longitudinale Justierung des Gestells in X-Richtung erfolgt durch die Verstellung des Lenkers **5**, die translatorische in Y-Richtung durch die gleichmäßige Verstellung der Lenker **4** und **6**. Die Höhenverstellung um Z geschieht durch Heraus- bzw. Hereinschrauben der drei Stellschrauben. Eine Rotation um Z wird durch eine ungleichmäßige Verstellung der Lenker **4** und **6** erreicht.

Das Problem ist, dass die Verstellung des Lenkers **5** keine reine Bewegung auf der X-Achse bewirkt, sondern eine Art Schaukelbewegung um die Festpunkte der Lenker **4** und **6**. Durch das Variieren der Lenker **4** bzw. **6** wird gleichermaßen keine reine Bewegung auf der Y-Achse erzeugt, sondern eine zusätzliche Verdrehung um die Z-Achse. Werden die Stellschrauben **1** und **3** oder **2** und **3** herausgeschraubt, so wird eine Verdrehung um die Y-Achse erreicht. Eine Verdrehung um die X-Achse geschieht bei Veränderung der Stellschrauben **1** und **2** oder **1** und **3**. Wird die Stellschraube **2** herausgeschraubt und die **3** nur um die Hälfte von **2** verlängert, so wird neben der Verdrehung um die X- und Y-Achse auch eine Verdrehung um die Z-Achse erzeugt. Somit wird deutlich, dass fast alle Achsbewegungen kinematisch gekoppelt sind und daher kombinierte Bewegungen erzeugt werden.

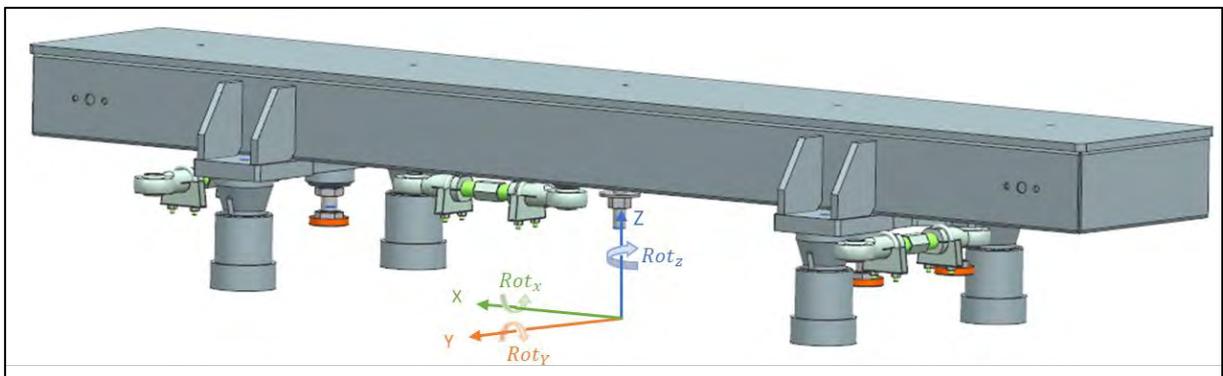


Abbildung 9: Freiheitsgrade des Lenkergestells (in Anlehnung an [7])

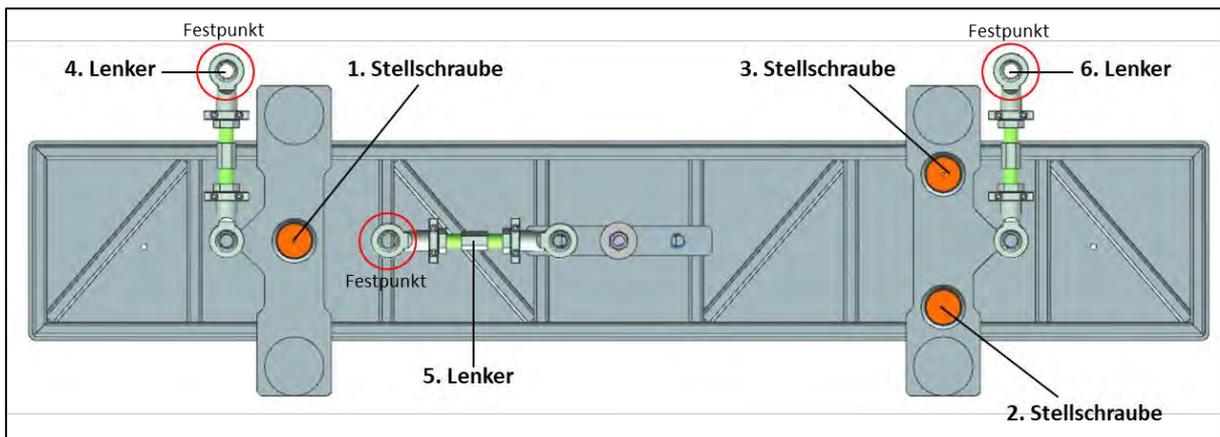


Abbildung 10: Kennzeichnung der Lenker und Stellschrauben, um Freiheitsgrade zu ermöglichen [7]

2.3 Weitere Justiereinheiten

2.3.1 EASy

Das Easy Alignment System (EASy) repräsentiert eine patentierte Baureihe (Patent Nr.: 10 2018 109 004) von Justiergestellen, die zurzeit aus den Modellen Basic (B), Precision (P), Advanced (A) und dem Typ P-N besteht. Zukünftig sollen je Modell sechs unterschiedliche Baugrößen entwickelt werden (Abbildung 11). Die EASy Baureihe wird am DESY in Beschleunigeranlagen wie FLASH, SINBAD oder ARES eingesetzt, um Komponenten, Proben oder Bauelemente für anstehende Experimente präzise ausrichten zu können. Das Positioniersystem ist modular aufgebaut und besitzt wie das Lenkersystem jeweils drei translatorische sowie rotatorische Achsen. Der Antrieb kann manuell oder motorisch erfolgen. Neben der hohen Präzision umfasst die Baureihe signifikante Eigenschaften wie eine hohe Tragfähigkeit und Steifigkeit, wodurch eine hohe erste Eigenfrequenz erreicht wird. Für die Sicherheit während des Betriebes werden zudem manuell einstellbare Hardstops eingesetzt, welche als Anschlag dienen. [10]



Abbildung 11: Zukünftige Entwicklung unterschiedlicher Baugrößen des EASy's [10]

In der nachfolgenden Abbildung 12 wird als Beispiel der EASy A3 dargestellt. Dieses Präzisionssystem bietet mit seiner hohen Tragfähigkeit von 2000 kg und einer Genauigkeit von 5 μm eine präzise Positionierung von Komponenten und Bauelementen. Aufgrund der einseitigen Bedienung sowie der kompakten Bauweise eignet sich der Einsatz bei geringem Bauraum. Der Verfahrweg beträgt in allen Richtungen etwa $\pm 7,5$ mm. [12]



Abbildung 12: EASy A3 [13]

2.3.2 Exzentrische Rolle - Micromover

Die unten in Abbildung 13 aufgeführte exzentrische Rolle, auch Micromover genannt, wurde am Paul Scherrer Institut PSI in der Schweiz gebaut. Mit dieser Justiereinheit wird ein translatorischer Freiheitsgrad in der Raumrichtung Z zur Höhenverstellung ermöglicht. Die Höhennivellierung erfolgt präzise und stufenlos. Der Achsabstand zwischen der exzentrischen Rolle und der angetriebenen Welle bestimmt den Verfahrweg (Abbildung 14). Dieser erreicht bei einer Winkeldrehung von 180° das Maximum der Höhenverstellung. Er ist somit konstruktiv abhängig und kann nicht beliebig durch Komponenten wie beispielsweise Distanzscheiben erweitert werden. Gleichermäßen kann anhand einer exzentrischen Rolle eine rotatorische Bewegung in eine translatorische und umgekehrt umgewandelt werden. Aufgrund der einfach gehaltenen Bau- sowie Funktionsweise bedarf es nur eines geringen Bauraumes. [4]

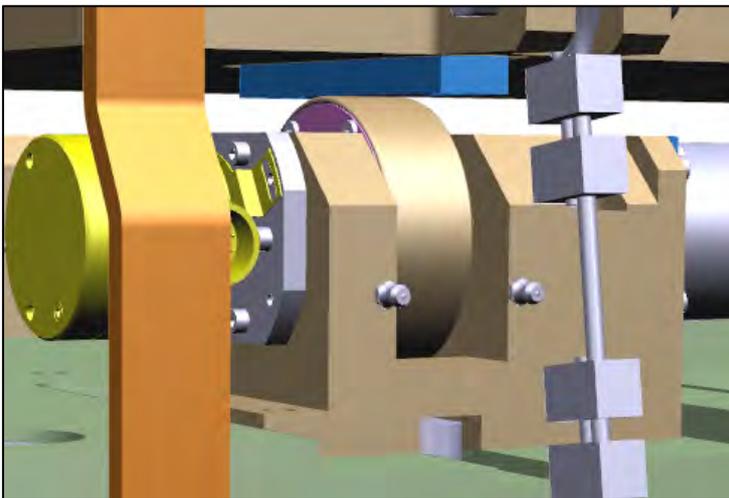


Abbildung 13: Exzentrische Rolle [4]

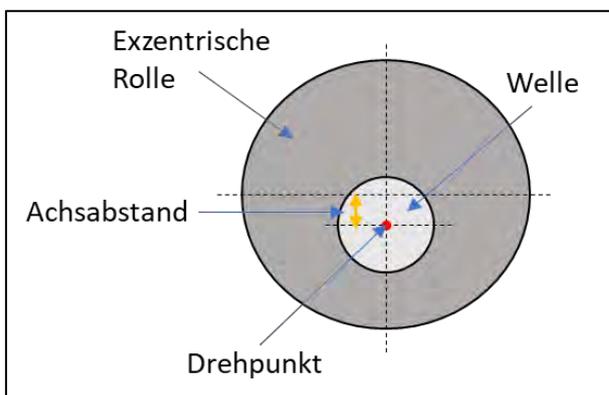


Abbildung 14: Skizze einer exzentrischen Rolle

2.3.3 Keilsysteme

Eine weitere Justiereinheit bietet die Firma Nivell mit ihren Präzisionsnivellierkeilen. In der nachfolgenden Abbildung 15 ist ein Doppelkeil der Bauform DK-2 aufgeführt. Die Abmessungen belaufen sich bei dieser Variante auf eine Länge von 175 mm und eine Breite von 120 mm. Anhand der Ausführung mit zwei Keilen wird sowohl ein symmetrisches und spielfreies als auch ein stufenloses Hochnivellieren bei einem Feineinstellweg von 7 mm auf eine Genauigkeit von 0,01 mm erzielt. Durch einschiebbare Distanzscheiben oberhalb der Maschinenauflage kann der Verfahrensweg beliebig erweitert werden. Eine horizontale Bewegung wird durch eine mittig ausgelegte Zentrierhülse vermieden. Ein weiterer positiver Aspekt ist die Verteilung der Kräfte auf beide Keile, wodurch eine Traglast von bis zu 15 t sichergestellt wird. Die vertikale Steifigkeit von 5000 N/ μm bietet zudem eine langanhaltende Präzision. Integrierte Anschläge für die Endstellungen sorgen für die nötige Sicherheit. [14]

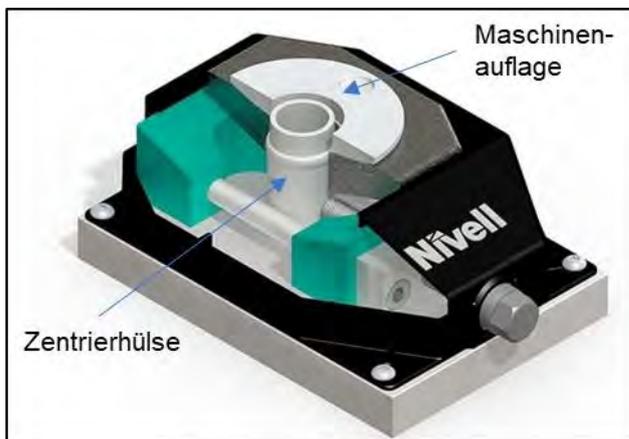


Abbildung 15: Präzisionsnivellierkeil der Bauform DK-2 [15]

2.3.4 Gestapeltes Linearachsensystem

Ein gestapeltes Linearachsensystem setzt sich aus einzelnen Linearachsen zusammen, die übereinander montiert werden. Ein Beispiel ist in Abbildung 16 dargestellt. Eine Linearachse umfasst jeweils eine stationäre sowie eine bewegliche Komponente. In diesem Modell wurden die Linearachsen von dem Unternehmen HUBER Diffraktionstechnik GmbH & Co. KG verwendet. Aufgrund des modularen Aufbaus, durch die einzelnen Linearachsen, können die Freiheitsgrade individuell je nach Bedarf bestimmt werden.

Die Abmaße des dargestellten Positioniersystems betragen in der Höhe und Breite 240 mm x 460 mm. bei einer Tragfähigkeit von 50 kg können bezüglich der Zusammenstellung verschiedener Linearachsen Genauigkeiten zwischen 5 μm und 15 μm erreicht werden. Gleichmaßen kann der Verfahrensweg von ± 3 mm bis 45 mm variieren. Wie beim EASy A3 ist

auch hier sowohl ein manueller als auch ein motorischer Antrieb über Präzisionsspindeln möglich. Das gestapelte Linearachsensystem ist mit justierbaren mechanischen Endlagenschaltern ausgestattet [10, 16]

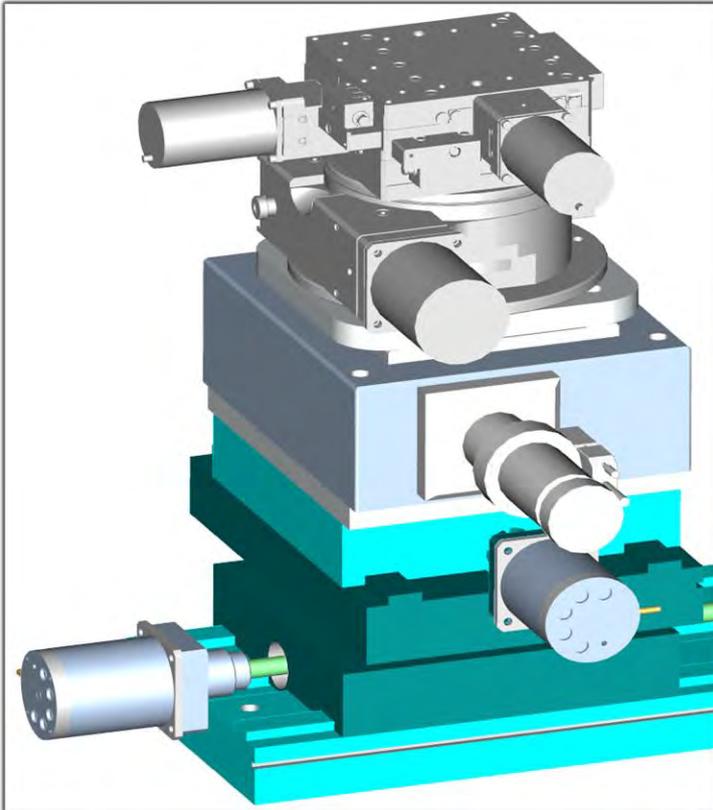


Abbildung 16: Gestapelte Linearachsen [10]

3 Konzeptentwicklung

Für die Konzeptentwicklung und Konstruktion der Girderjustiereinheit werden die wesentlichen Schritte der methodischen Produktentwicklung durchlaufen. Diese Vorgehensweise dient dem Produktentwickler zu einem bewussteren Planen seiner Produktidee und folglich zu einer zielorientierten Durchführung. Innerhalb dieser Arbeit wird zu Beginn eine Anforderungsliste an die zu entwickelnde Justiereinheit erstellt. Mittels eines Ideenfindungsverfahrens, dem morphologischen Kasten, werden im weiteren Verlauf diverse Lösungsideen ermittelt. Um eine bestmögliche Lösung zu erhalten, werden die verschiedenen Lösungsalternativen den Bewertungskriterien aus der Anforderungsliste unterzogen. [17]

3.1 Funktionsbeschreibung

Die Justiereinrichtung soll für die präzise Justierung von Magnetstrukturen eingesetzt werden und muss daher große Lasten aufnehmen können. Elektrisch betrieben in einem Remote-Control-System sollen die Bewegungen in alle Raumrichtungen sowie die Verschiebung der Justiereinheit zur zeitweisen Wartung ausgeführt werden.

3.2 Anforderungsliste

Im Folgenden wird die Anforderungsliste an die Girderjustiereinheit in tabellarischer Form (Tabelle 1) dargestellt. Sie dient zur Auflistung aller Forderungen (F) und Wünsche (W). Je nach Wichtigkeit der Wünsche, werden diese in sehr wichtig (W4), wichtig (W3), wenn möglich (W2) und nicht wichtig (W1) kategorisiert.

Die Anforderungsliste wurde in Anlehnung an [17] erstellt.

W4=sehr wichtig W3=wichtig W2=wenn möglich W1=nicht wichtig		Anforderungsliste Konzeptentwicklung und Konstruktion einer Girderjustiereinheit für DL-Ablenkmagnete	Datum: 01.09.2021	
			Blatt: 1 von 2	
Lfd. Nr.	F/W	Anforderung	Änderung	Verantw. ortl.
Funktion/ Betrieb				
1	W4	Bedienerfreundlich/ Bedienungsart (manuell)		
2	W3	Parameterüberprüfung		
Geometrie				
3	W3	maximale Länge ca. 1502 mm		
4	W4	maximale Höhe 223 mm		
Kinematik				
5	F	Anzahl der Freiheitsgrade: 6		
6	F	transversale Positionsgenauigkeit mind. 20 µm		

3 Konzeptentwicklung

Lfd. Nr.	F/W	Anforderung	Änderung	Verantw ortl.
7	F	longitudinale Positionsgenauigkeit max. 100 µm		
8	W3	Verfahrweg der Lineareinheit: 200 mm - 300 mm		
9	W3	Tragfähigkeit: mindestens 2 T		
10	F	Schwingungsverhalten: mind. 100 Hz		
		Signale		
11	W3	Fehlerauslesung des Systems (Überwachungssystem)		
		Sicherheit		
12	F	Anbringung von Hardstops		
		Stoff		
13	W4	Verwendung unmagnetischer Werkstoffe		
14	W4	Strahlungsresistente Werkstoffe		
		Ergonomie		
15	W3	Bedienung über Remote Control		
16	W1	Justierung (Bedienung) manuell (Kurbel)		
17	W1	Justierung über lokalen Motor (Akkuschrauber)		
18	W3	Justierung (Bedienung) motorisch		
19	W2	kurze Rüstzeiten		
20	F	modularer Aufbau		
		Fertigung		
21	F	Einsatz von Kaufteilen		
22	W3	Standardfertigungsverfahren		
		Qualitätswesen/ -kontrolle		
23	W4	Qualitätssicherung durch Montagemitarbeiter		
24	W4	Genauigkeiten der Messungen sicherstellen		
		Montage		
25	W3	Verschleißteile montagefreundlich montier-/ demonierbar		
26	F	Zugänglichkeit der Girder gewährleisten		
		Transport		
27	W2	Transportösen		
		Inbetriebnahme		
28	W3	Kalibrierung durch Fachpersonal		
		Wartung/ Instandhaltung		
29	W2	wartungsfreundlich (Ausheizprozess)		
		Recycling/ Entsorgung		
30	W2	Werkstoff recycle- und trennbar		

Lfd. Nr.	F/W	Anforderung	Änderung	Verantw ortl.
		Termine		
31	W4	Fertigstellung eines Prototypens der Girderjustiereinheit bis Ende 2021		
		Umfeld		
32	W1	Schutz vor Schmutzpartikeln		
33	W2	Betrieb bei Raumtemperatur		
		Normen/ Vorschriften		
34	F	VDI Richtlinie 2221- Entwicklung technischer Produkte und Systeme		
35	F	VDI Richtlinie 2222- Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien		
36	F	VDI Richtlinie 2223- Methodisches Entwerfen technischer Produkte		

Tabelle 1: Anforderungsliste der Girderjustiereinheit [4]

3.3 Morphologischer Kasten

Anhand des systematischen Lösungsfindungsverfahrens, dem morphologischen Kasten (Abbildung 17), kann eine Übersichtlichkeit der Lösungsdarstellung geschaffen werden. Es werden Teilfunktionen aufgelistet, für die unterschiedliche Teilproblemlösungen zusammengetragen werden. Durch diverse Kombinationen lassen sich hieraus Lösungsvarianten ermitteln, die als neues Justiersystem in Frage kommen könnten. Die zu behandelnden Teilfunktionen in dieser Arbeit umfassen in der ersten Ebene die Justiereinheit und Lineareinheit. Die Justiereinheit wird in der zweiten Ebene in *Plattenausführung*, *Transversale/ Longitudinale Justage*, *Höhenverstellung* und der *rotatorischen Justage* unterteilt. Hier wird in der dritten Ebene jeweils auf den *Antrieb*, die *Führung* sowie bei der Plattenausführung auf das *Material* und das *Profil* eingegangen. Die Lineareinheit ist gegliedert in *Linearbewegung* und *Messtechnik*. Hier werden gleichermaßen Varianten bezüglich des *Antriebes*, der *Führung* und *Endlagen* betrachtet. Der morphologische Kasten wurde in Anlehnung an [17] erstellt.

3 Konzeptentwicklung

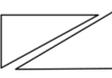
Morphologischer Kasten: Girderjustiereinheit						
Teilfunktionen			Lösungsvarianten			
1. Ebene	2. Ebene	3. Ebene	1. Variante	2. Variante	3. Variante	4. Variante
Justiereinheit	Plattenausführung	Material	Stahl (S235JR)	Edelstahl (1.4301)	Aluminium	GFK
		Profil				
	Transversale/Longitudinale Justage	Antrieb	Elektromotor	Hydraulikmotor	Pneumatikmotor	Manuell (Kurbel)
		Führung	Nutenstein 	Rundstange und Buchse 	Linearachsen 	Präzisions-Kugelgewindetrieb 
	Höhenverstellung	Antrieb	Elektrisch	Hydraulisch	Pneumatisch	Manuell (Kurbel)
		Führung	Keile 	Exzentrische Rolle 		
Justiereinheit	Rotatorische Justage	Antrieb	Elektrisch	Hydraulisch	Pneumatisch	Manuell (Kurbel)
		Führung	Kreuzrollenlager 	Nutenstein 		
Lineareinheit	Linearbewegung	Antrieb	Elektrisch	Hydraulisch	Pneumatisch	Manuell (Kurbel)
		Führung	Linearachsen 	Rundstange und Buchse 	Nutenstein 	Präzisions-Kugelgewindetrieb 
	Messtechnik	Endlage	manuell über Spindel und Mutter 	Induktiver Sensor 	Lasersensor 	
			1	2	3	4

Abbildung 17: Morphologischer Kasten [18-25]

Aus dem morphologischen Kasten haben sich vier Lösungsvarianten ergeben, die in der nachfolgenden Abbildung 18 systematisch dargestellt werden.

3 Konzeptentwicklung

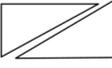
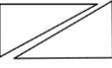
Morphologischer Kasten: Girderjustiereinheit							
Teilfunktionen			Lösungsvarianten				
1. Ebene	2. Ebene	3. Ebene	1. Variante	2. Variante	3. Variante	4. Variante	
Justiereinheit	Plattenausführung	Material	GFK	Aluminium	Edelstahl (1.4301)	Stahl (S235JR)	
		Profil	Flachprofil 	Flachprofil 	Flachprofil 	Flachprofil 	
	Transversale/ Longitudinale Justage	Antrieb	Manuell (Kurbel)	Elektromotor	Elektromotor	Elektromotor	
		Führung	Nutenstein 	Nutenstein 	Präzisions-Kugelgewindetrieb 	Linearachsen 	
	Höhenverstellung	Antrieb	Manuell (Kurbel)	Elektrisch	Elektrisch	Elektrisch	
		Führung	Exzentrische Rolle 	Keile 	Exzentrische Rolle 	Keile 	
	Justiereinheit	Rotatorische Justage	Antrieb	Manuell (Kurbel)	Elektrisch	Elektrisch	Elektrisch
			Führung	Nutenstein 	Nutenstein 	Kreuzrollenlager 	Kreuzrollenlager 
Lineareinheit	Linearbewegung	Antrieb	Manuell (Kurbel)	Elektrisch	Elektrisch	Elektrisch	
		Führung	Rundstange und Buchse 	Nutenstein 	Präzisions-Kugelgewindetrieb 	Linearachsen 	
	Messtechnik	Endlage	manuell über Spindel und Mutter 	manuell über Spindel und Mutter 	Induktiver Sensor 	Lasersensor 	

Abbildung 18: Lösungsvarianten [18-25]

3.4 Lösungsbewertung

Die vorliegenden Lösungsvarianten werden bei der Lösungsbewertung darauf geprüft, ob die Forderungen aus der Anforderungsliste erfüllt werden. Entspricht eine Variante einer Forderung nicht, wird diese aus der Bewertung genommen. In der nachfolgenden Tabelle 2 wird diese Bewertungsmethode dargestellt. Hieraus kann entnommen werden, dass zwei der vier Lösungsvarianten aufgrund fehlender Übereinstimmung mit den Forderungen für das weitere Verfahren nicht berücksichtigt werden. Die Lösungsvariante 1 entfällt aus der

Bewertung, da Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) keinem strahlungsresistenten Werkstoff entspricht. Die Lösungsvariante 4 ist aufgrund des verwendeten Baustahls (S235JR) magnetisch und ist somit ebenfalls nicht für die künftige Konstruktion geeignet.

Die folgende Lösungsbewertung wurde in Anlehnung an [17] erstellt.

Lösungsbewertung					
Forderungen		Lösungsvarianten			
		LV 1	LV 2	LV 3	LV 4
5	Anzahl der Freiheitsgrade: 6	✓	✓	✓	✓
6	transversale Positionsgenauigkeit mind. 20 µm	✓	✓	✓	✓
7	longitudinale Positionsgenauigkeit max. 100 µm	✓	✓	✓	✓
12	Anbringung von Hardstops	✓	✓	✓	✓
13	Verwendung unmagnetischer Werkstoffe	✓	✓	✓	✗
14	Verwendung Strahlungsresistenter Werkstoffe	✗	✓	✓	✓
20	modularer Aufbau	✓	✓	✓	✓
21	Einsatz von Kaufteilen	✓	✓	✓	✓

Tabelle 2: Lösungsbewertung

3.5 Rangfolgegewichtung

In einem folgendem Gewichtungsverfahren (Abbildung 19) werden die Wünsche aus der Anforderungsliste nach ihrer Rangfolge priorisiert. Ist ein Bewertungskriterium als sehr wichtig (W4) kategorisiert, wird dieses automatisch höher präferiert (+), als eine niedrigere Kategorisierung (-). Stimmen zwei Kriterien in ihrer Wichtigkeit überein, müssen diese untereinander priorisiert werden. Für die Bewertungskriterien wird jeweils der Gewichtungsfaktor ermittelt, welcher in Summe bei rechtmäßiger Anwendung des Verfahrens eins ergibt. Hierfür werden in jeder Zeile die „+“ zusammengerechnet und die gesamte Summe gebildet. Anschließend wird der Wert jeder Zeile durch die Gesamtsumme dividiert, wodurch sich die einzelnen Gewichtungsfaktoren errechnen lassen.

Die Rangfolgegewichtung wurde in Anlehnung an [17] durchgeführt.

3.6 Wertigkeitsverfahren

Nachdem der morphologische Kasten erstellt und die Lösungsbewertung durchgeführt wurde, werden die Lösungsvarianten anschließend anhand der Bewertungskriterien über ein Wertigkeitsverfahren (Tabelle 3) analysiert und bewertet. Hierfür wird ein Punktesystem mit einer Werteskala von 0 (unbefriedigend) bis 4 (sehr gut) genutzt. Die jeweiligen Punktzahlen der Kriterien werden mit den aus Kapitel 3.5 errechneten Gewichtungsfaktoren multipliziert und miteinander addiert. Somit ergibt sich für jede Lösungsvariante eine Gesamtlösung der Wertigkeit, die Aufschluss über die bestmögliche Lösung gibt. Eine Lösungsvariante gilt laut VDI 2225 als „sehr gut“, wenn eine Wertigkeit von mindestens 80% erreicht wird. Die Lösungsbewertung hat ergeben, dass die Lösungsvarianten 1 und 4 für die weitere Bewertung nicht in Betracht gezogen werden. In dem folgendem Wertigkeitsverfahren werden sie daher für jedes Bewertungskriterium mit einer „0“ gewichtet. Aus der Gesamtlösung der Wertigkeit lässt sich entnehmen, dass die Lösungsvariante 2 die bestmögliche ist. In Kapitel 3.7 wird diese Auswahl näher erläutert.

Das Wertigkeitsverfahren wurde in Anlehnung an [17] durchgeführt.

3 Konzeptentwicklung

		Wertigkeitsverfahren									
0=unbefriedigend											
1=ausreichend											
2=befriedigend											
3=gut											
4=sehr gut											
Lfd	W	Bewertungskriterien	Gew. gi	LV 1		LV 2		LV 3		LV 4	
				Pi	gi*Pi	Pi	gi*Pi	Pi	gi*Pi	Pi	gi*Pi
1	W2	Bedienerfreundlich	0,017		0	3	0,051	3	0,051		0
2	W3	Parameterüberprüfung (Positionserfassung)	0,044		0	4	0,176	4	0,176		0
3	W4	maximale Länge ca. 1502 mm	0,071		0	4	0,285	4	0,285		0
4	W4	maximale Höhe 223 mm	0,078		0	4	0,312	4	0,312		0
8	W4	Verfahrweg der Lineareinheit: 200 mm - 300 mm	0,075		0	4	0,298	4	0,298		0
9	W3	Tragfähigkeit: mindestens 2 T	0,054		0	4	0,217	2	0,108		0
10	W3	Schwingungsverhalten: mind. 100 Hz	0,054		0	3	0,163	1	0,054		0
11	W3	Fehlerauslesung des Systems (Überwachungssystem)	0,047		0	4	0,190	4	0,190		0
15	W3	Bedienung über Remote Control	0,041		0	4	0,163	4	0,163		0
16	W1	Justierung (Bedienung) manuell (Kurbel)	0,003		0	4	0,014	0	0,000		0
17	W1	Justierung über lokalen Motor (Akkuschrauber)	0,007		0	3	0,020	2	0,014		0
18	W3	Justierung (Bedienung) motorisch	0,037		0	4	0,149	4	0,149		0
19	W2	kurze Rüstzeiten	0,024		0	3	0,071	2	0,047		0
21	W2	manuelle Bedienung von einer Seite	0,016		0	4	0,064	0	0,000		0
23	W3	Standardfertigungsverfahren	0,034		0	4	0,136	2	0,068		0
24	W4	Qualitätssicherung durch Montagemitarbeiter	0,068		0	4	0,271	4	0,271		0
25	W4	Genauigkeiten der Messungen sicherstellen	0,075		0	2	0,149	4	0,298		0
26	W3	Verschleißteile montagefreundlich montier-/ demontierbar	0,031		0	3	0,092	2	0,061		0
27	W4	Zugänglichkeit des Girders gewährleisten	0,064		0	4	0,258	4	0,258		0
28	W2	Transportösen	0,027		0	3	0,081	3	0,081		0
29	W3	Kalibrierung durch Fachpersonal	0,047		0	4	0,190	4	0,190		0
30	W2	wartungsfreundlich (Ausheizprozess)	0,017		0	4	0,068	4	0,068		0
31	W2	Werkstoff recycle- und trennbar	0,010		0	2	0,020	2	0,020		0
33	W1	Schutz vor Schmutzpartikeln	0,000		0	4	0,000	4	0,000		0
34	W2	Betrieb bei Raumtemperatur	0,014		0	4	0,054	4	0,054		0
Summe gi*Pi =					0		3,491		3,217		0
Rangfolge =							1		2		
Wertigkeit Gesamtlösung =					0		87,278		80,424		0

Tabelle 3: Wertigkeitsverfahren

3.7 Begründete Auswahl der Lösungsvariante

Die Bewertungsverfahren ergeben, dass die Lösungsvariante 2 (Abbildung 20) die optimale Lösung für das neue Justiersystem darstellt. Für die Konstruktion der Girderjustiereinheit werden aufgrund der geringen Bauhöhe von 223 mm Flachprofile verwendet. Bei der Materialauswahl ist Aluminium die günstigere Variante. Die Vorteile des Werkstoffes sind, dass er sowohl unmagnetisch als auch strahlungsresistent ist. Zudem besitzt Aluminium bei ähnlicher Materialstabilität wie Edelstahl eine geringere Dichte, was ein weiterer Vorteil für die Konstruktion ist. Da reines Aluminium allerdings eine niedrigere Festigkeit besitzt, wird sich für eine Aluminiumlegierung entschieden. [4]

Der Antrieb für die einzelnen Justagen in longitudinaler und transversaler Richtung sowie zur rotatorischen Bewegung und Höhenverstellung erfolgt jeweils über einen elektrischen Antrieb. Mit Hilfe von Nutensteinen kann sowohl eine geradlinige Führung als auch eine rotatorische Bewegung präzise und stufenlos durchgeführt werden. Aufgrund der einfachen Bauweise können diese selbsttätig und individuell hergestellt werden. Auch ein Präzisions-Kugelgewindetrieb würde sich durch das geschliffene Spindelgewinde für eine exakte lineare Justierung eignen und weist zudem eine hohe Tragfähigkeit auf. Allerdings sind die Abmessungen für diese Konstruktion zu groß. Weiterhin würde diese Präzisionseinheit von der Verwendung ausgeschlossen werden, da zum Schutz des Kugelgewindetriebs Kunststoffabstreifer in die Kugelgewindemutter integriert werden. Kunststoff ist kein strahlungsresistenter Werkstoff und würde sich mit der Zeit zersetzen. [21]

Der Einsatz von Linearachsen entfällt gleichermaßen. Trotz der hohen Präzision und Steifigkeit reicht die kompakte Bauweise nicht für den zur Verfügung stehenden Bauraum aus. Die Höhenverstellung erfolgt über die Verwendung eines Keilprinzips. [20]

Die Linearbewegung der Lineareinheit erfolgt über einen Schrittmotor. Auch hier ist die Verwendung von Linearachsen, einem Präzisions-Kugelgewindetrieb oder einem geführten Schlitten über Rundstangen aufgrund der geringen Bauhöhe ungünstig. Zur Realisierung der Linearbewegung werden folglich Nutensteine in die Platten eingeführt. Daraus ergibt sich der große Vorteil, dass keine zusätzliche Bauhöhe in Anspruch genommen wird.

Für die Endlagenerfassung der Lineareinheit kommt eine manuell verstellbare Einheit zum Einsatz. Über eine Schraube und eine Mutter (siehe Abbildung 20, Absatz Messtechnik) wird der Verfahrweg für den Ausheizprozess der Vakuumkammer begrenzt. Da sich der Verfahrweg zwischen 200 mm und 300 mm befinden soll und daher keine präzise Messung nötig ist, kann auf den Gebrauch eines Lasersensors verzichtet werden.

1. Ebene	2. Ebene	3. Ebene	2. Variante
Justiereinheit	Plattenausführung	Material	Aluminium
		Profil	Flachprofil 
	Transversale/ Longitudinale Justage	Antrieb	Elektromotor
		Führung	Nutenstein 
	Höhenverstellung	Antrieb	Elektrisch
		Führung	Keile 
Justiereinheit	Rotatorische Justage	Antrieb	Elektrisch
		Führung	Nutenstein 
Lineareinheit	Linearbewegung	Antrieb	Elektrisch
		Führung	Nutenstein 
	Messtechnik	Endlage	manuell über Spindel und Mutter 

Abbildung 20: Lösungsvariante 2

4 Konstruktion

Nach Abschluss der Konzeptentwicklung wird in den folgenden Unterkapiteln die Lösungsvariante 2 konstruktiv ausgearbeitet. Das zu entwickelnde Konzept wird aufgrund der Anforderungen, insbesondere des geringen Bauraumes, in Anlehnung an den EASy A3 (siehe Kapitel 2.3.1) entworfen. In der nachstehenden Abbildung 21 wird das Ergebnis der Girderjustiereinheit dargestellt. Die Girderjustiereinheit setzt sich aus zwei Hauptgruppen zusammen. Der Justiereinheit und der Lineareinheit. Die Konstruktion ist modular aufgebaut und kann die sechs Freiheitsgrade realisieren. Anhand des verwendeten motorischen Antriebes (siehe Kapitel 4.1.1, Abbildung 27) können die geforderten Positionsgenauigkeiten erreicht werden. Die Platten wurden so konstruiert, dass diese zum Teil ineinanderliegen, um den Platzbedarf zu reduzieren.

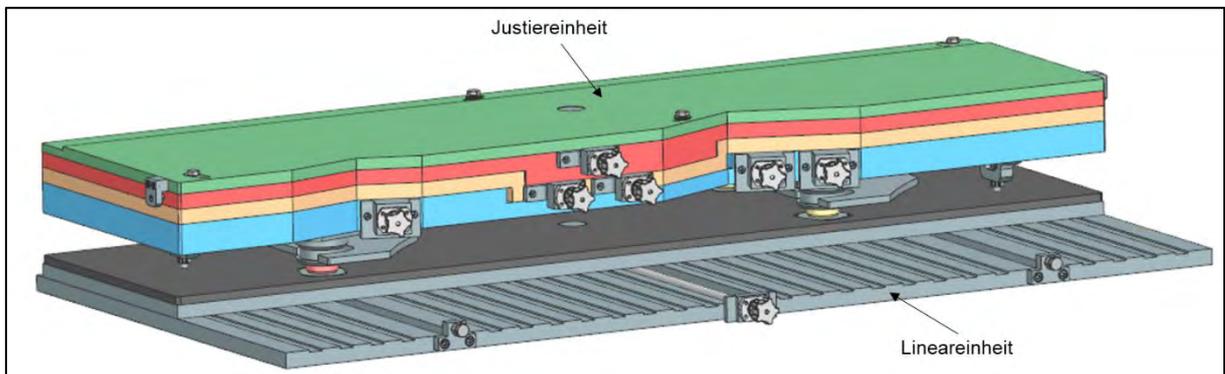


Abbildung 21: CAD-Modell der Girderjustiereinheit

4.1 Justiereinheit

In der nachstehenden Abbildung 22 wird die Justiereinheit dargestellt. Zusätzlich sind sowohl die translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade, welche mit dem Konzept ermöglicht werden können, als auch die Richtung des Photonenstrahls eingezeichnet.

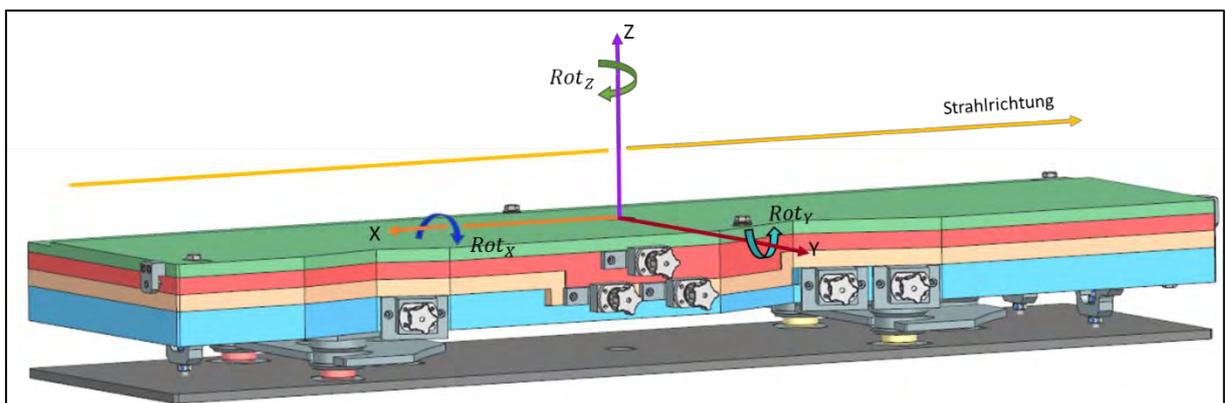


Abbildung 22: Justiereinheit mit Darstellung der Freiheitsgrade

Die Justiereinheit umfasst die Elevationsbasis, den Kreuztisch und eine Rotationsplatte. Die nachfolgende Abbildung 23 zeigt den modularen Aufbau, der in den weiteren Kapiteln in Hinblick auf die Konstruktion beschrieben wird. Die Abbildung wurde in Anlehnung an [10] erstellt.

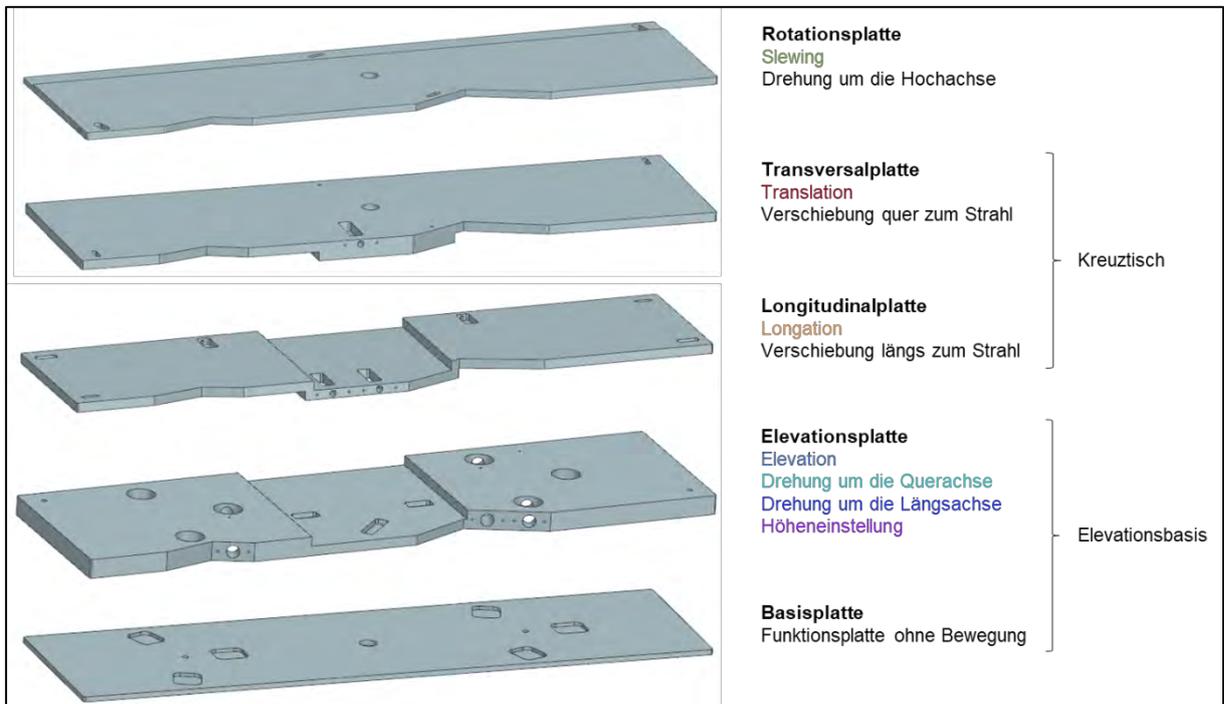


Abbildung 23: Modularer Aufbau der Justiereinheit

4.1.1 Elevationsbasis

Die Elevationsbasis (Abbildung 24) besteht aus einer Basis- und Elevationsplatte sowie aus drei Antriebseinheiten und sechs Stempeln. Mit dieser Einheit kann sowohl eine Höhenverstellung als auch eine Rotation um die Längs- und Querachse ausgeführt werden. Auf der Basisplatte befinden sich die sechs Stempel, die jeweils auf einer sogenannten Kegelpfanne aufliegen. Diese Kegelpfannen sind in einer Ausfräsung geführt, sodass eine eindeutige Bewegung ermöglicht wird. Die drei nach innen positionierten Auflagerstempel verfügen über eine andere Funktion als die drei äußeren Federstempel. Sie sind über einen Kolben mit der Antriebseinheit verbunden und bilden als Gesamtes eine Art Keilprinzip (Abbildung 25). Der Kolben wird aufgrund seiner Länge beidseitig geführt, einmal durch die Elevationsplatte und einmal durch eine Bohrung in der Buchse. Mittels dieser Ausführung werden die Durchbiegung, die aufgrund des Eigengewichts und des Gewichts der Magnetstruktur entsteht, sowie das axiale Spiel, minimal gehalten. Bei gleichmäßiger Einstellung gleitet der Kolben über die angeschrägte Fläche des Auflagerstempels vor oder zurück und ermöglicht somit den translatorischen Freiheitsgrad in der Raumrichtung Z zur

Höhenverstellung. Eine Pass-Schulterschraube, die sich in der Nut des Kolbens befindet und in der Elevationsplatte verschraubt ist, dient als Verdrehsicherung. Analog zu dieser Funktion verhindert die Schraube, dass der Kolben bei der Bewegung vom Auflagerstempel herunterrutscht und verkantet. Der Auflagerstempel wird ebenso in der Buchse geführt. Eine Wellenfeder zwischen den beiden Komponenten bewirkt eine Vorspannung, welche bei einer Auflast die Kraft erhöht und somit ein gleichmäßiges Verhalten beim Gleiten erreicht. Die verwendete Wellenfeder von der Firma Smalley beansprucht 50% weniger Bauraum als herkömmliche Federn und bietet dennoch gleichwertige Federkräfte [26]. Die höchste zulässige Last dieser Bauform beträgt 125 N [27].

Die Federstempel besitzen gleichermaßen eine Wellenfeder innerhalb der Buchse (Abbildung 26) und nehmen ebenfalls die wirkenden Kräfte auf. Durch die Verwendung der Federstempel wird eine höhere Stabilität des Girders erreicht. Zudem werden die Stempel über eine Kippsicherung miteinander gekoppelt. Die Elevationsbasis besitzt zudem Höhenendlagen, um den Verfahrweg in der Höhe zu begrenzen. Um den rotatorischen Freiheitsgrad um Y für eine Verdrehung um die Längsachse zu erzeugen, werden entweder nur die beiden rechten Antriebe oder nur der linke bedient. Der rotatorische Freiheitsgrad um X, mit dem Ziel einer Verdrehung um die Querachse, geschieht bei einer Verstellung des linken und einer der rechten Kolben.

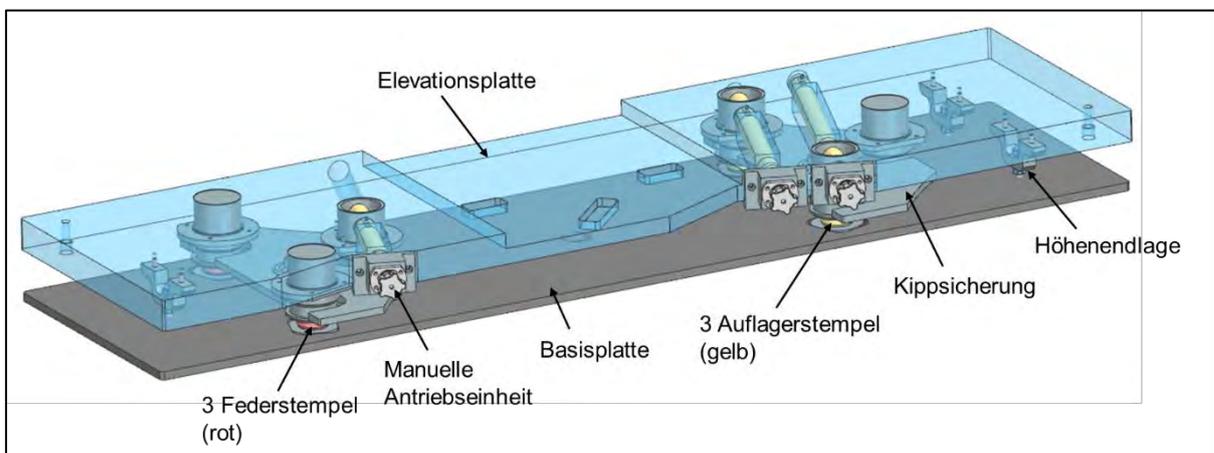


Abbildung 24: Elevationsbasis

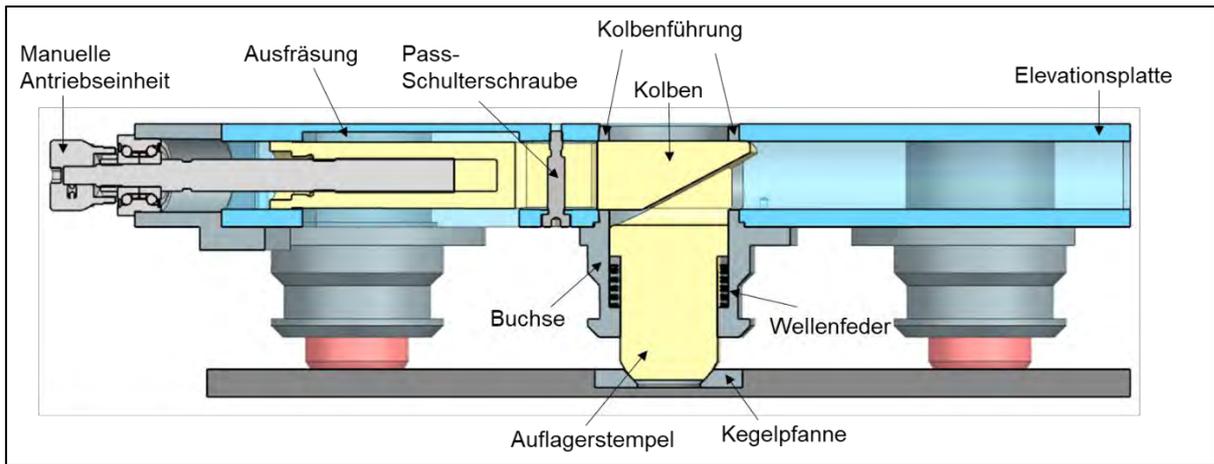


Abbildung 25: Darstellung des Keilprinzips

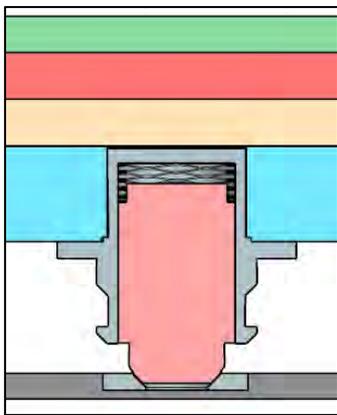


Abbildung 26: Federstempel

Im dargestellten Konzept wird der Antrieb manuell über ein Handrad vorgenommen. Das Handrad wird über zwei Gewindestifte auf der Antriebsspindel montiert. Ein Schrägkugellager wird benötigt, da dieses eine hohe Belastbarkeit aufweist und große radiale sowie axiale Kräfte aufnehmen kann. Zugehörig zum Lager wird eine Präzisionsmutter für die axiale Vorspannung gewählt. Entsprechend der Anforderungsliste wäre zudem eine motorische Justierung wünschenswert.

Für die Umsetzung wird die in Abbildung 27 gezeigte Antriebseinheit aus dem bestehendem EASy A3 eingesetzt. Diese setzt sich aus einem Schrittmotor, einem Planetengetriebe und einer Permanentmagnet-Bremse zusammen. Der wesentliche Vorteil des Schrittmotors liegt in seiner hohen Präzisionsgenauigkeit, welche durch das Planetengetriebe zusätzlich gesteigert wird [28, 29].

Der Antrieb lässt sich formschlüssig über einen Sechskant in das Handrad integrieren. Um eine ausreichende Steifigkeit zu erlangen, muss zusätzlich eine Befestigung zur Stützung der Motoren an die Elevationsplatte montiert werden.

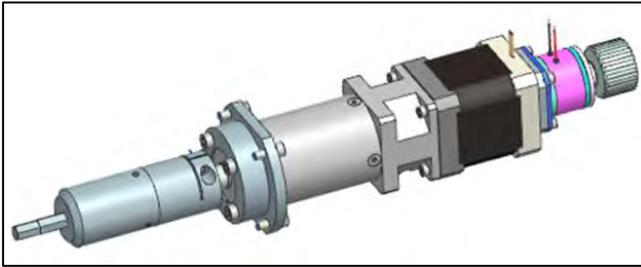


Abbildung 27: Motorische Antriebseinheit [30]

Varianten der Stempelausführung

Für die Konstruktion der Buchsen, in denen die Auflagerstempel geführt werden, wurden drei Varianten erstellt. Im Folgenden werden diese dargestellt und erläutert. Als erste Variante wurde die Buchse als separate Komponente zwischen der Basisplatte und der Elevationsplatte eingesetzt. In der Abbildung 29 wird sichtbar, dass der Kolben lediglich in der Elevationsplatte geführt wird. In der Elevationsplatte befindet sich zusätzlich eine längliche Ausfräsung (Abbildung 25 und Abbildung 29), wodurch der Kolben überwiegend freiliegt. Aufgrund der Länge des Kolbens kann es somit zu einer Durchbiegung kommen. Da der Bauraum ein wesentlicher Faktor für die Konstruktion ist, muss insbesondere auf diesen geachtet werden. Durch die separate Ausführung kann der zulässige Bauraum von 223 mm eingehalten werden.

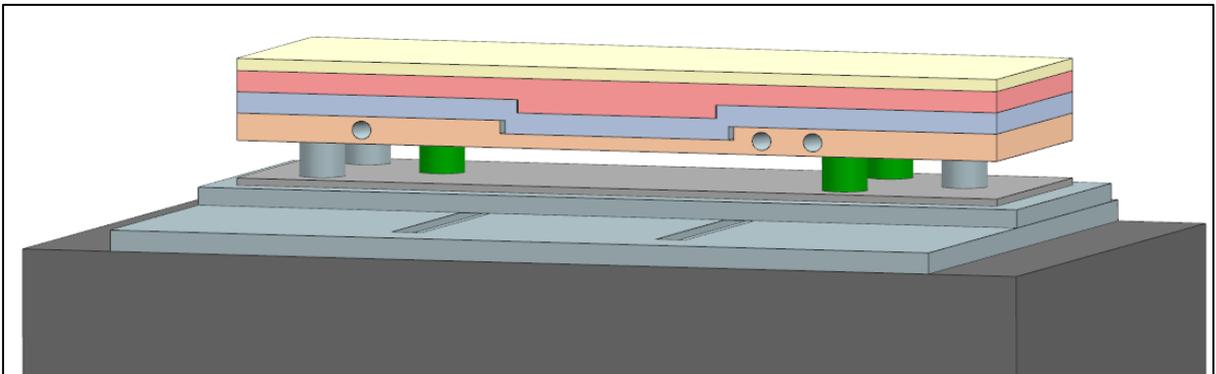


Abbildung 28: Variante 1 der Buchse

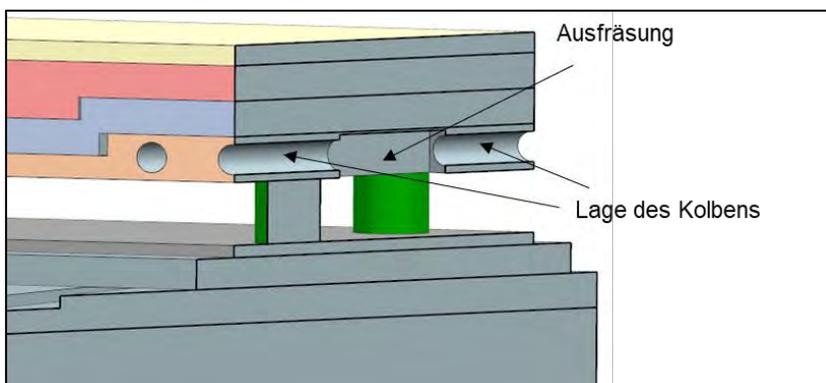


Abbildung 29: Schnittansicht der Variante 1

In der Variante 2 (Abbildung 30) wird die Buchse so ausgeführt, dass sie um die Dicke der Elevationsplatte verlängert wird und eine feintolerierte Bohrung auf der Höhe des Durchgangsloches erhält. In der Elevationsplatte befindet sich eine Nut, wodurch der Kolben überwiegend freiliegt (Abbildung 25). Durch die Bohrung in der Buchse wird der Kolben zusätzlich gelagert und geführt. Das hat den Vorteil, dass aufgrund der Länge des Kolbens die Durchbiegung gering gehalten wird und Kräfte besser aufgenommen werden können. Auch bei dieser Variante wird die Bauhöhe nicht verändert.

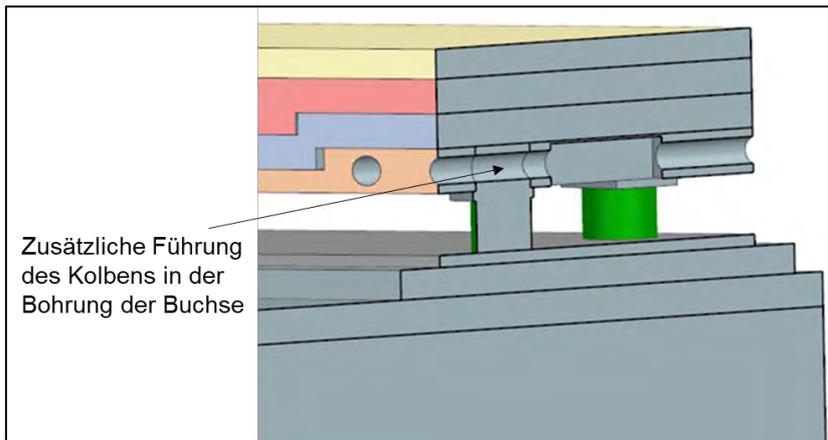


Abbildung 30: Schnittansicht der Variante 2

Die Abbildung 31 zeigt die dritte Variante der Buchse. Hier bilden die Führung des Kolbens und die Buchse eine Einheit. Durch die gemeinsame Ausführung fällt die Elevationsplatte weg, was dazu führt, dass eine zusätzliche Platte eingebaut werden müsste. In dieser Platte würden dann die Komponenten eingebaut werden, die für die longitudinale Verschiebung erforderlich sind. Dies erweist sich als wesentlicher Nachteil, da hierdurch die Bauhöhe erheblich erweitert ist und die Bauhöhe von 223 mm überschreitet. Gäbe es bezüglich des Bauraumes keine Vorgaben, wäre der Vorteil dieser Variante, dass die Komponente individuell unter dem Justiergestell platziert werden könnte.

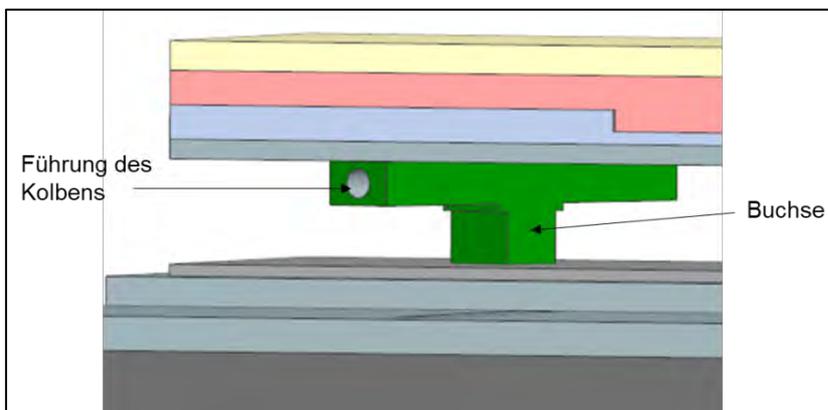


Abbildung 31: Ansicht der Variante 3

Zusammenfassend lässt sich daraus schließen, dass die letzte Variante aufgrund des größeren Bauraumes aus der Auswahl herausfällt. Die Varianten eins und zwei erfüllen dieses Kriterium. Allerdings würde der Kolben bei der ersten Lösungsvariante durch die unzureichende Führung stärker durchbiegen als bei der zweiten. Demzufolge soll für die Konstruktion die Variante 2 umgesetzt werden, da dies die bestmögliche Lösung für die Ausführung der Buchsen darstellt.

Aufstellvarianten der Auflager- und Federstempel

Ein weiterer konstruktiver Punkt bestand darin, wie die Auflager- und Federstempel unter der Justiereinheit angeordnet werden müssen. In den nachstehenden Abbildungen ist jeweils die Draufsicht der Varianten dargestellt. Dabei repräsentieren die grünen Kreise die angetriebenen Auflagerstempel, die blauen Kreise die Federstempel und die grauen Balken die Kolben. In longitudinaler Richtung (in Raumrichtung X) verläuft der Photonenstrahl. In der ersten Abbildung wird die Variante 1 schematisch beschrieben (Abbildung 32). Hier wurde die Aufstellung aus vier Federstempeln und drei Auflagerstempeln zusammengestellt. Die angetriebenen Auflagerstempel wurden dabei in einem Dreieck angeordnet, um die Stabilität und somit die Steifigkeit zu erhöhen. Die vier Federstempel wurden zwischen die Auflagerstempel in einem gleichen Abstand zu diesen platziert. Aufgrund der ungeraden Anzahl an Stempeln weist diese Variante keine Symmetrie in X-Richtung auf. Das hat zur Folge, dass eine ungleichmäßige Verteilung der Kraft auftritt und die Wahrscheinlichkeit besteht, dass die Justiereinheit in Richtung Tunnelwand kippt. Demzufolge ist diese Lösung nicht geeignet.

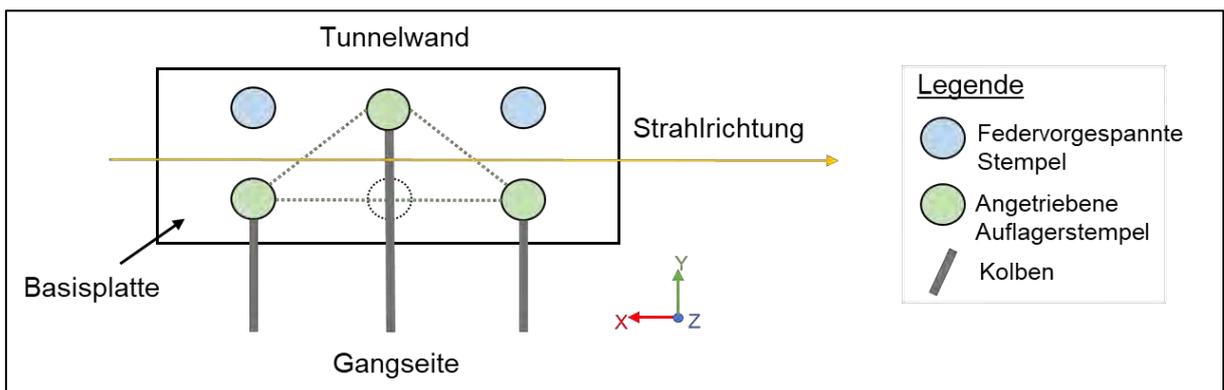


Abbildung 32: Aufstellvariante 1 der Stempel und Legende

Die nachfolgende Skizze (Abbildung 33) zeigt die Variante 2 der Aufstellung. Hierfür werden wieder drei Auflagerstempel in einem Dreieck angeordnet. Die Federstempel werden auf die Anzahl von zwei reduziert und in einer Linie zu den Auflagerstempeln platziert, sodass ein quaderförmiges Profil entsteht. Die Überlegung ist, einen dritten Federstempel zwischen die beiden vorderen Stempel zu positionieren. Der Antrieb soll einseitig von der Gangseite aus zu

bedienen sein und die Kolben in dieser Lösung quer zum Strahl konstruiert werden. Daher kann ein weiterer Stempel nicht dazwischen positioniert werden, da sich beide Komponenten innerhalb der Elevationsplatte befinden. In diesem Falle ist ebenfalls keine Symmetrie und somit eine ungleichmäßige Verteilung der Last vorhanden. Das Justiersystem kann zur Gangseite hin kippen und ist somit auch nicht für die Konstruktion günstig.

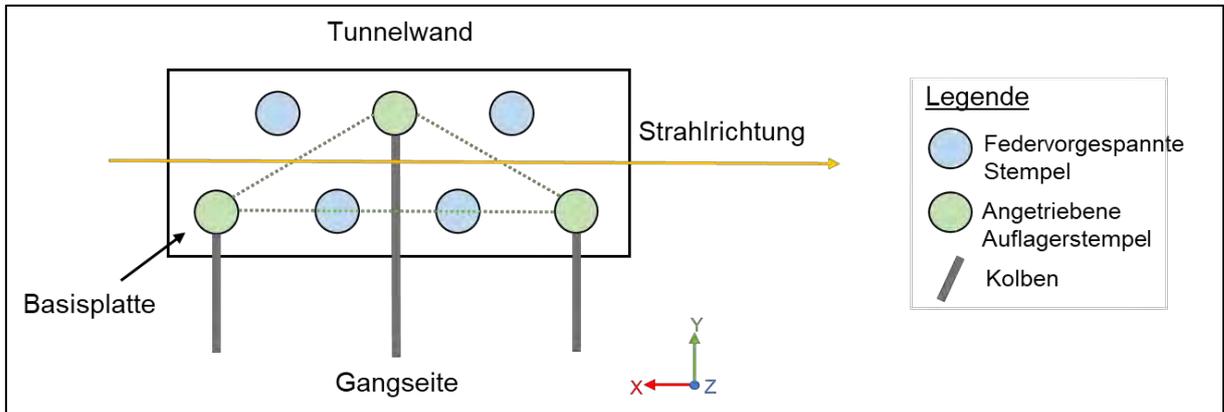


Abbildung 33: Stempelanordnung in der Aufstellvariante 2

Die dritte Variante (Abbildung 34) wird aus drei Auflagerstempeln und drei Federstempeln zusammengesetzt. Die Auflagerstempel werden näher zur Mitte hin positioniert. Zwei der Stempel auf der rechten Seite und der dritte auf der linken. Die Federstempel befinden sich außerhalb der Auflagerstempel und werden so angeordnet, dass auf beiden Seiten jeweils drei Stempel sind, die ein Dreieck bilden. Durch diese Zusammenstellung wird eine Symmetrie in X-Richtung gegeben, die eine gleichmäßige Verteilung der Kraft bewirkt. Aufgrund der Anordnung können die Kolben nicht quer zum Strahl ausgerichtet werden. Es wird ein Winkel von 20° zur Y-Achse bevorzugt, da dies der kleinste Winkel ist, bei dem die Kolben auf der rechten Seite nicht miteinander kollidieren.

Diese Lösungsvariante erweist sich als die optimalste und wird dementsprechend umgesetzt. Ein weiterer Aspekt, der beachtet werden muss, ist die Positionierung der Stempel, um eine minimale Durchbiegung des Justiersystems zu erzielen. Nach dem Besselprinzip werden zwei Auflager behandelt, die jeweils um 22% von der Gesamtlänge der Außenkante entfernt positioniert werden müssen [31]. Das Problem in dieser Konstruktion besteht darin, dass beidseitig drei Stempel (Auflager- und Federstempel) ausgeführt sind. Aus diesem Grund wurde sich nur an das Prinzip von Bessel angelehnt mit der Erwartung, dass die Positionierung etwas abweichen wird. Die Punkte wurden jeweils in den Mittelpunkt der Dreieckstruktur der Stempel gelegt. Bei einer Gesamtlänge von 1500 mm liegen diese bei 330 mm.

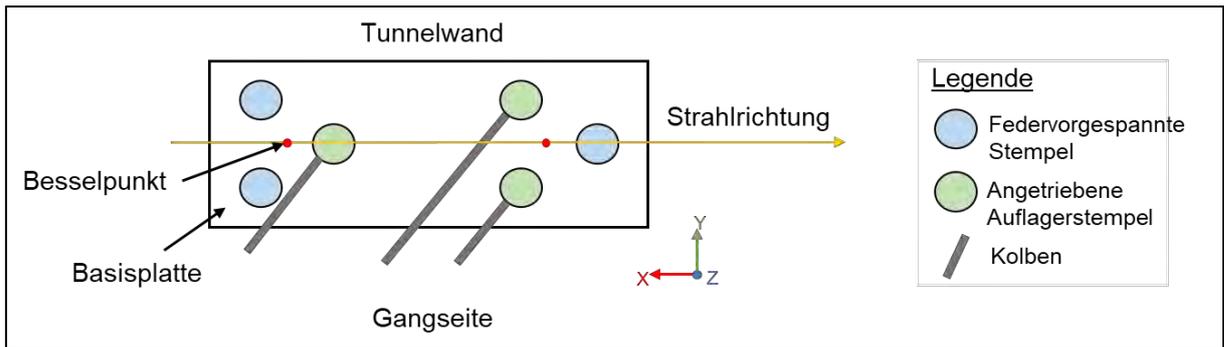


Abbildung 34: Stempelordnung in der Aufstellvariante 3

4.1.2 Kreuztisch

Der Kreuztisch setzt sich aus der Longitudinal- und Transversalplatte zusammen. Diese beiden Komponenten sind für die horizontale Verschiebung in X- und Y-Richtung zuständig. Der Antrieb wird, wie bei der Elevationsplatte, manuell dargestellt und kann über die motorische Antriebseinheit aus der Abbildung 27 erweitert werden. Im weiteren Verlauf werden die zusammenwirkenden Bauteile in Bezug auf den Bewegungsmechanismus erläutert.

Longitudinalplatte

Die Funktion der Longitudinalplatte wird mithilfe der Abbildung 35 verdeutlicht. Mit dieser Platte kann eine Verschiebung längs zum Strahl auf der X-Achse ausgeführt werden. Für die Realisierung der Bewegung werden Nutensteine verwendet. Die Spindel des Antriebes ist über ein Feingewinde mit einem Nutenstein verbunden, der zusätzlich mit einem Zapfen ausgelegt wurde (Abbildung 36). In der Elevationsplatte befindet sich ein um 45° gedrehter Nutenstein, der mittig eine Bohrung besitzt, in die der Zapfen gesteckt wird. Zwei weitere Nutensteine, die längs zum Strahl ausgerichtet sind, sind für die Führung der Longitudinalplatte zuständig (Abbildung 37). Sie sind über eine Passverbindung mit der Elevationsplatte verbunden. Die Longitudinalplatte kann durch eine verlängerte Nut einen Verfahrweg von $\pm 7,5$ mm realisieren. Durch den Antrieb wird der 45° - Nutenstein in Bewegung gesetzt. Anhand des Winkels und der beiden Nutensteine wird die Bewegung längs zum Strahl vorgenommen. Zwischen der Absenkung der Longitudinalplatte und der Elevationsplatte besteht beidseitig ein Luftspalt von 9 mm, um den Verfahrweg von $\pm 7,5$ μm zu garantieren.

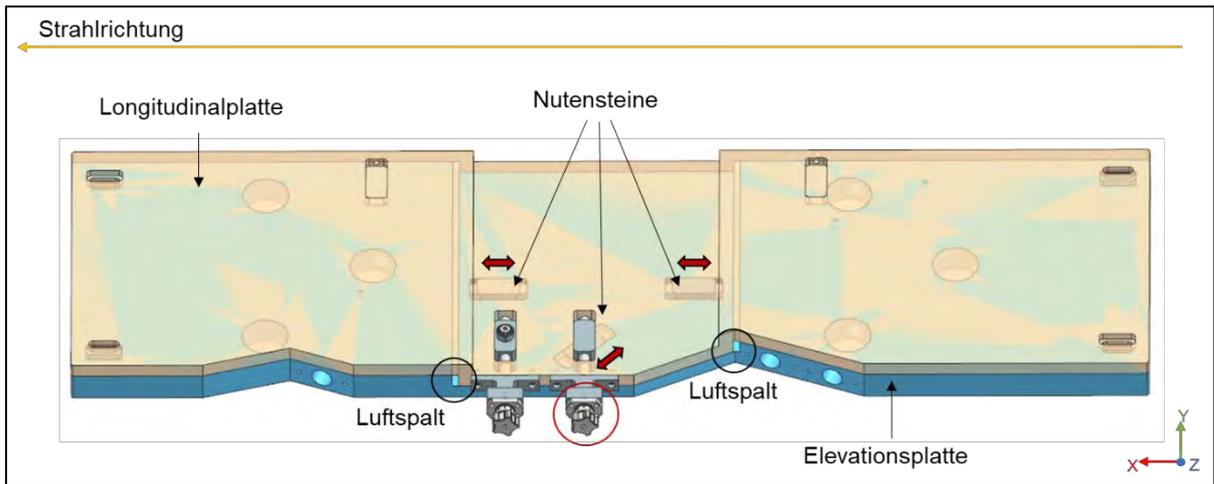


Abbildung 35: Longitudinalplatte mit Bewegungsrichtungen der Nutensteine

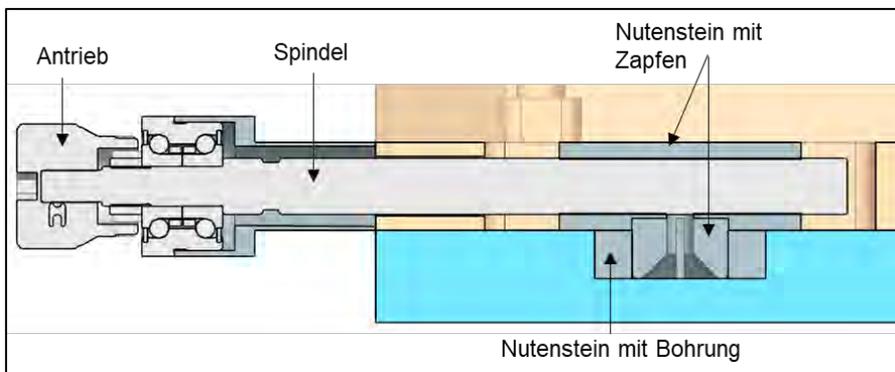


Abbildung 36: Schnittdarstellung der Antriebseinheit innerhalb der Longitudinalplatte

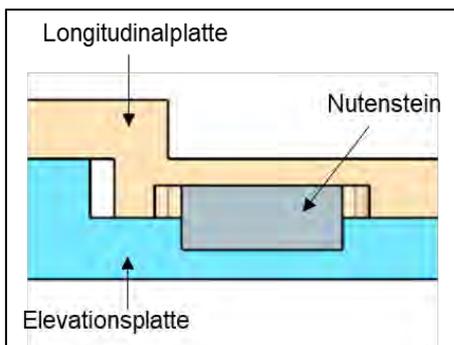


Abbildung 37: Schnittdarstellung des Nutensteins zur longitudinalen Bewegungsführung

Transversalplatte

Mit der Transversalplatte (Abbildung 38) wird die Bewegung quer zum Strahl auf der Y-Achse ausgeführt. Hierfür werden drei Nutensteine verwendet. Der Erste wird für die Übertragung der Bewegung auf die Spindel des Antriebes geschraubt. Der Nutenstein besitzt zudem einen Zapfen, der in eine runde Ausfräsung in der Transversalplatte eingefügt wird (Abbildung 39). Wird der Antrieb bedient, so wird der Nutenstein in Bewegung gesetzt. Der Zapfen dient als sogenannter Mitnehmer und ist über eine Passung mit der Transversalplatte verbunden. Hierdurch wird die Transversalplatte verschoben. In der Abbildung 40 ist ein Nutenstein dargestellt, der zweimal verbaut wird (siehe Abbildung 38). Er wird in Y-Richtung angeordnet und verbindet die Longitudinalplatte mit der Transversalplatte, um die Verschiebung zu führen. Zwischen der Longitudinalplatte und der Transversalplatte befinden sich beidseitig 2 mm Luftspalte, um eine Reibung während der Verschiebung zu verhindern. Die Endlagenerfassung geschieht über Gewindestifte (Abbildung 40).

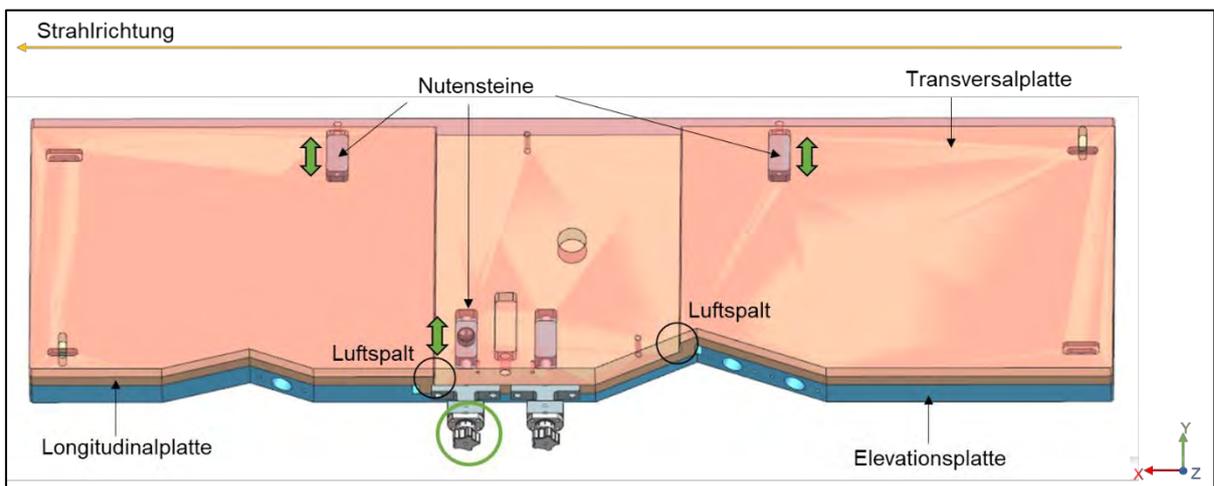


Abbildung 38: Transversalplatte mit Bewegungsrichtung der Nutensteine

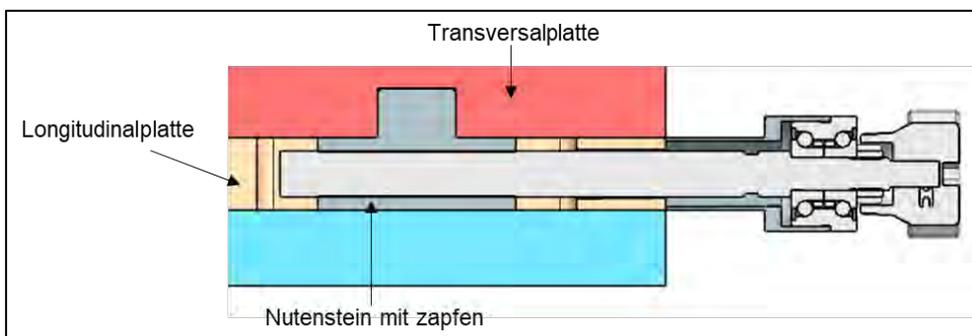


Abbildung 39: Antriebseinheit der transversalen Verschiebung

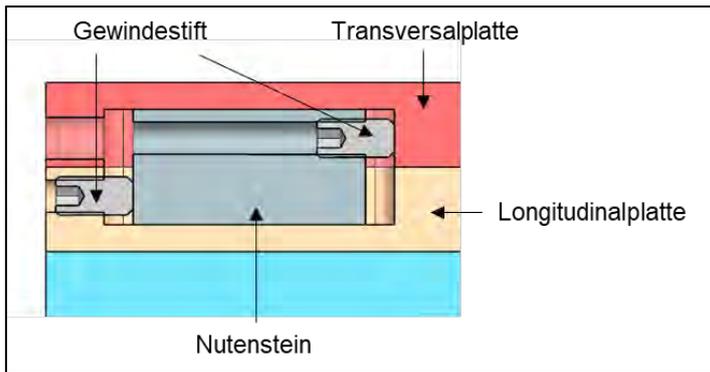


Abbildung 40: Nutenstein zur Führung der Transversalplatte mit Endlagen

4.1.3 Rotationsplatte

Die oberste Platte der Justiereinheit ist die Rotationsplatte (Abbildung 41). Die Antriebseinheit ist an der Transversalplatte montiert. Die Verdrehung erfolgt anhand von zwei Nutensteinen. Einer der Nutensteine befindet sich in der Transversalplatte und wird auf die Antriebsspindel geschraubt. Er ist mit einem Zapfen ausgeführt, auf den der zweite Nutenstein gesteckt wird. Dieser befindet sich in der Rotationsplatte und ist in einem 45° Winkel ausgerichtet. Ein zentraler Lagerzapfen, der sich in der Transversal- und Rotationsplatte befindet, dient als Drehpunkt für die Rotationsplatte. Wird der quer zum Strahl gerichtete Nutenstein angetrieben, wird die geradlinige Bewegung anhand des Winkels und des Lagerzapfens in eine Drehbewegung umgewandelt. Zur Endlagenerfassung werden an beiden Seiten Hardstops (Abbildung 42 und Abbildung 43) angebracht, die an der Rotationsplatte fixiert sind. Dreht sich die Platte, so stößt sie bei Erreichen der Endlage an den Gewindestift. Über diesen wird die Endlage eingestellt.

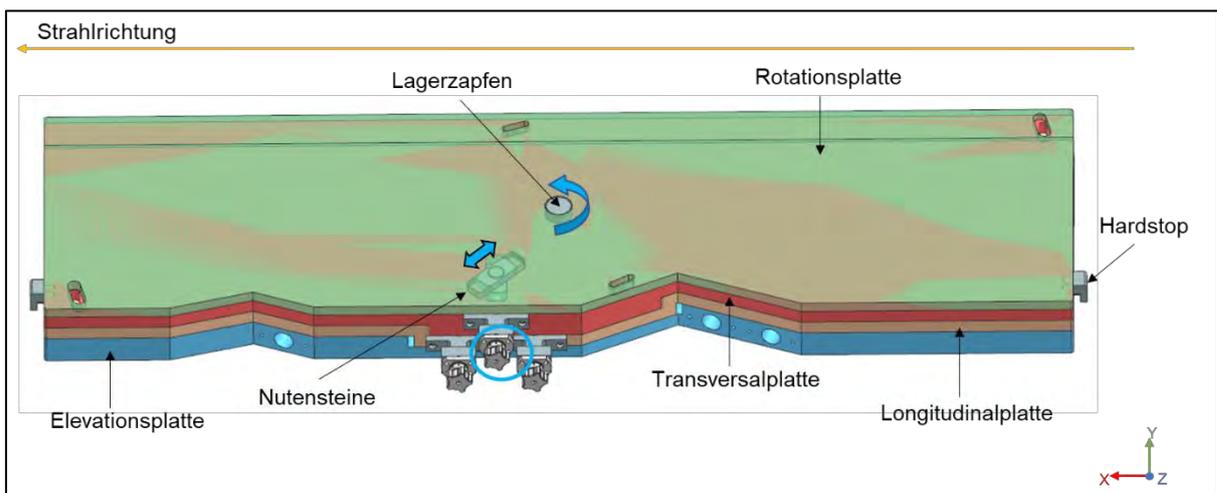


Abbildung 41: Rotationsplatte mit Bewegungsrichtung der Nutensteine

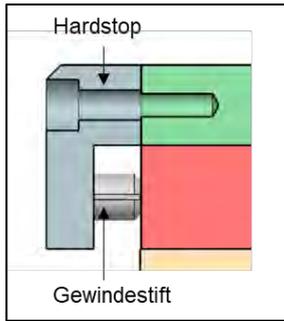


Abbildung 42: Schnittansicht des Hardstops

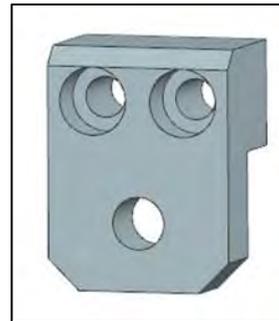


Abbildung 43: Hardstop

4.1.4 Montage der Platten nach der Justage

Nachdem die Justage der Girderjustiereinheit vorgenommen und die exakte Positionierung erreicht wurde, müssen die einzelnen Platten in ihrer Position fixiert werden. Die blau umkreiste Verschraubung (Abbildung 44 und Abbildung 45) ist die Verschraubung der Rotations- und Transversalplatte. In der Transversalplatte ist ein Gewinde, in das die Schraube eingeschraubt wird. Die Rotationsplatte hat eine Nut, die sich auf einem Teilkreis befindet, sodass bei erneuter Justage die Platte bewegt werden kann.

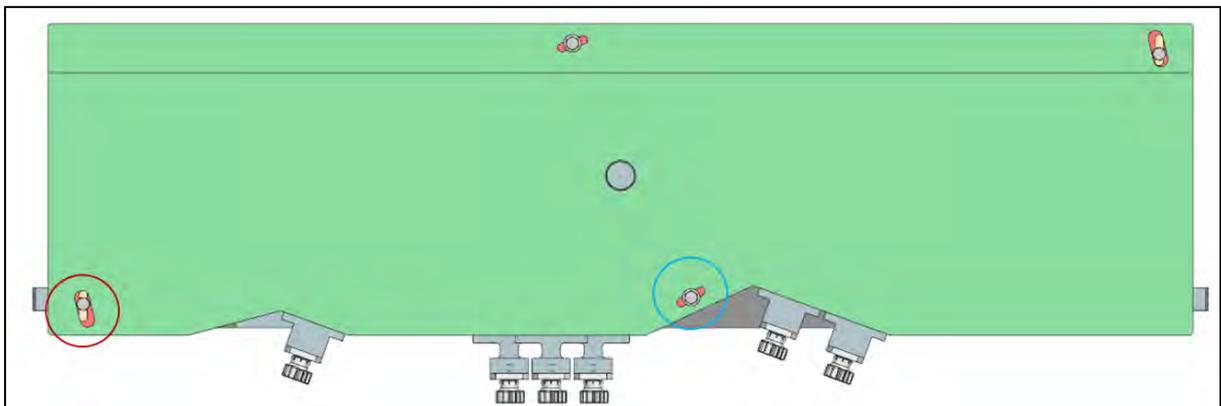


Abbildung 44: Draufsicht der Girderjustiereinheit

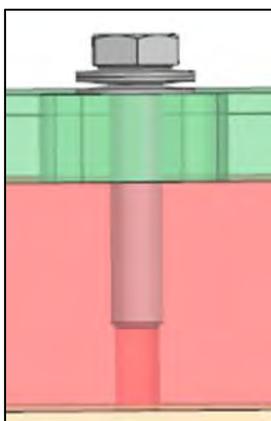


Abbildung 45: Verschraubung der Rotations- und Transversalplatte

Die rot umkreiste Verschraubung (Abbildung 44 und Abbildung 46) dient der Fixierung der Rotations-, Transversal- und Longitudinalplatte. In der Rotationsplatte befindet sich wieder eine Nut, die auf einem Teilkreis konstruiert wurde. Die darunter liegende Transversalplatte besitzt eine Nut in transversaler Richtung, die Longitudinalplatte eine in Längsrichtung. Für die Verschraubung wird ein Nutenstein in die Longitudinalplatte gesteckt und mit einer Schraube verbunden. Die Schraube wird zusätzlich durch eine Hülse gesteckt, die durch Anziehen der Schraube auf die Transversalplatte gedrückt wird. Anschließend werden die drei Platten auf die Elevationsplatte gelegt. Die Abmaße der Nutfräsungen wurden so ausgelegt, dass eine Verschiebung von $\pm 7,5 \mu\text{m}$ in X- sowie Y-Richtung durchgeführt werden kann.

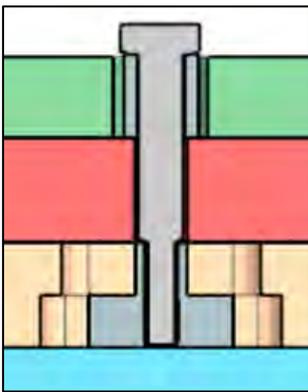


Abbildung 46: Schnittansicht der Verschraubung der Rotations-, Transversal- und Longitudinalplatte

Die folgende Darstellung (Abbildung 47) zeigt die Verschraubung der Longitudinalplatte mit der Elevationsplatte. In der Elevationsplatte ist eine Bohrung, durch die eine Schraube gesteckt wird. In der Longitudinalplatte befindet sich eine Nut, in die ein Nutenstein eingesetzt und mit der Schraube verschraubt wird.

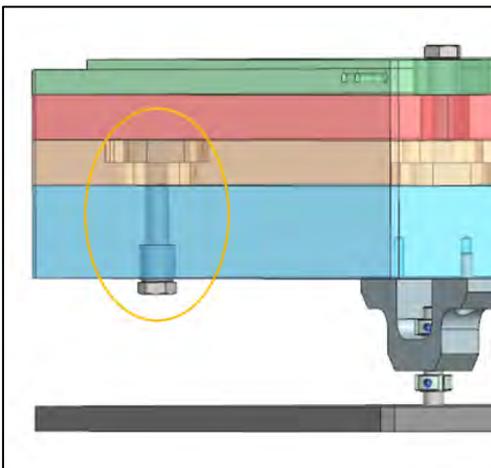


Abbildung 47: Darstellung der Verschraubung von Longitudinal- und Elevationsplatte

4.2 Lineareinheit

Für das seitliche Herausfahren der Girderjustiereinheit wurde eine Lineareinheit entwickelt (Abbildung 48). Die Lineareinheit setzt sich aus zwei Platten, vier Endlagen und einer Antriebseinheit zusammen.

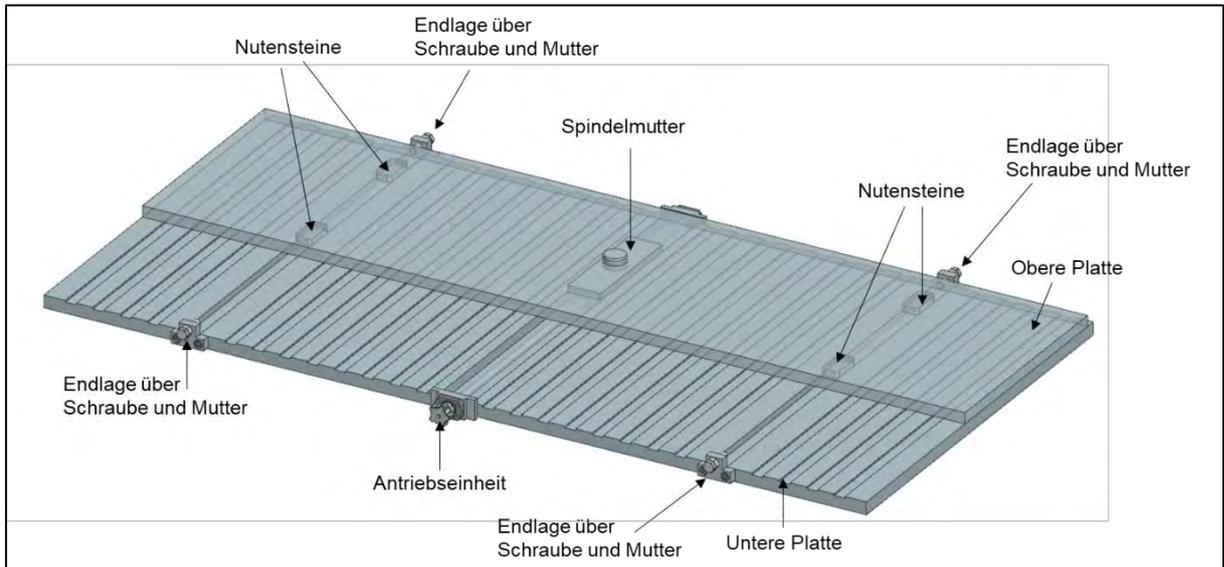


Abbildung 48: Lineareinheit

Die untere Platte der Lineareinheit soll in einer kammartigen Struktur hergestellt werden, da hierdurch der Oberflächenkontakt und somit die Reibung während der Verschiebung minimiert wird. Es wird die gleiche Antriebseinheit verwendet wie für die Positionierung der Justiereinheit. An der Vorderseite wird diese durch den motorischen Antrieb erweitert. In die Platte wird eine Nut gefertigt, in die eine Spindelmutter eingesetzt wird. Sie besitzt eine Bohrung mit einem Feingewinde, in das die Antriebsspindel geschraubt wird. Die Antriebsspindel wird am Ende über ein Schrägkugellager gelagert, welches die axialen und radialen Kräfte aufnimmt und an der Platte über einen Einsatz verschraubt wird. In die Platte werden zusätzlich zwei weitere Nuten eingefräst, um das Herausfahren der Girderjustiereinheit zu führen. Für die Führung werden Nutensteine verwendet, die die Bewegung übertragen sollen. Diese sind in der obersten Platte in eine Passung gesetzt. Die Spindelmutter ist außerdem mit einem Zapfen ausgeführt und verbindet die Lineareinheit mit der Basisplatte der Justiereinheit. Um beide Einheiten zu Fixieren und eine Verdrehsicherheit zu gewährleisten, werden zusätzlich Schraubverbindungen gewählt.

Die Endlagenerfassung geschieht manuell über eine Spindel bzw. eine Schraube und eine Mutter (Abbildung 49). Hierfür wird kein Feingewinde benötigt, da lediglich ein Herausfahren der Einheit von 200 mm – 300 mm erwünscht ist.

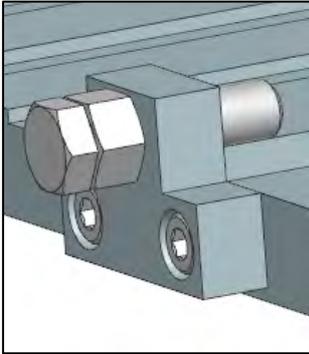


Abbildung 49: Endlagenerfassung über Schraube und Mutter

5 FEM-Analyse

Die Finite-Element-Methode ist eine numerische Berechnungsmethode, bei der eine virtuelle Produktentwicklung schnell und günstig am Computer durchgeführt werden kann. Das Verfahren kann unter anderem zur Berechnung und Analyse von Spannungen und Verformungen sowie der Eigenmoden von Komponenten angewendet werden. Es liefert Aussagen, ob eine Optimierung hinsichtlich der Steifigkeit und Spannungsverteilung der Bauteile erforderlich wäre. Für die Analyse wird das zu prüfende Bauteil aufbereitet. Es werden Geometrien wie Fasen oder Bohrungen entfernt, die keinen Einfluss auf das statische und dynamische Verhalten haben und die Berechnung aufgrund der feinen Vernetzung an diesen Stellen umfangreich gestalten würden, ohne dass Erkenntnisse gewonnen werden. Für die Geometrie des Bauteils wird eine Netzstruktur aus Elementen und Knotenpunkten generiert. Wird die Vernetzung sehr fein gewählt, um konkrete Ergebnisse zu erzielen, so erhöht sich die Rechenleistung und damit die Berechnungszeit. Demzufolge ist es sinnvoll, eine Vernetzung zu wählen, die aussagekräftig ist und gleichzeitig über eine verhältnismäßig geringe Berechnungszeit verfügt. In den folgenden Unterkapiteln wird eine statisch-mechanische Analyse sowie eine Modalanalyse an der Girderjustiereinheit durchgeführt. Die statisch-mechanische Analyse gibt Auskunft über mögliche Schwachstellen, indem Verformungen und Spannungen anhand einer äußeren Krafteinwirkung untersucht werden. Bei der Modalanalyse wird das dynamische Verhalten in Hinsicht auf die Eigenfrequenzen und deren zugehörigen Eigenformen untersucht. Es werden Eigenfrequenzen ermittelt, bei denen jeweils eine Eigenform auftritt, die die Verformung darstellt. Diese dienen dazu Aussagen über die Steifigkeit des Systems treffen zu können. [32, 33]

5.1 Statisch-mechanische Analyse

Für die statisch-mechanische Analyse wird die Girderjustiereinheit so abgeändert, dass ein vereinfachtes Modell vorliegt (Abbildung 50). Hierfür werden Geometrien wie Fasen, Ausfräsungen und Bohrungen sowie Komponenten wie Nutensteine oder Kolben aus dem Modell entfernt. Dieses Vorgehen ist hilfreich, da nur Komponenten und Geometrien betrachtet werden, die für die Analyse ausschlaggebend sind. Da der eigentliche Kraftfluss über die Schraubverbindungen aufgenommen wird, können die Kolben und Nutensteine vernachlässigt werden. Des Weiteren werden die Basisplatte und die Lineareinheit nicht mit in die Analyse einbezogen, da sich diese unterhalb der Konstruktion befinden und somit keinen Einfluss auf das statische Verhalten haben.

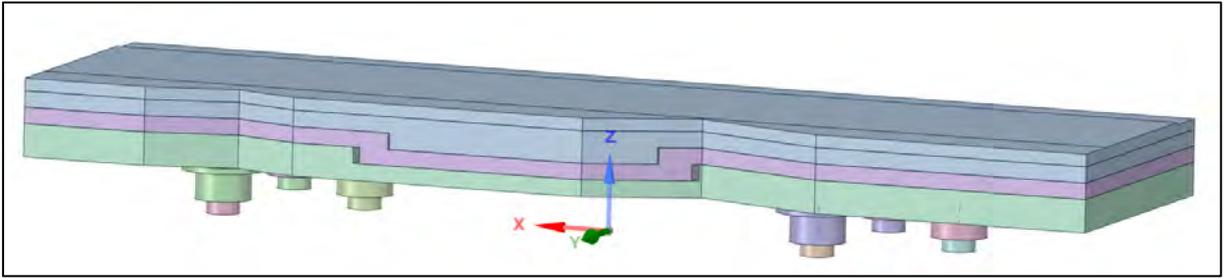


Abbildung 50: Vereinfachtes CAD-Modell der Girderjustiereinheit

In der folgenden Abbildung 51 wird als Beispiel der Vereinfachung die Buchse dargestellt. Bohrungen und Fasen wurden entfernt, sodass lediglich eine zylindrische Geometrie bestehen bleibt. In der nächsten Darstellung (Abbildung 52) wird die Netzstruktur vor und nach der Vereinfachung beispielhaft aufgezeigt. Dadurch wird deutlich, dass ein gleichmäßigeres Netz erreicht und somit der Aufwand der Berechnung und die damit verbundene Berechnungszeit minimiert werden kann. Zudem hat die Vereinfachung zur Folge, dass die Ergebnisse geringfügig ungenauer werden, da weniger Knoten und Elemente mit in die Berechnung einbezogen werden.

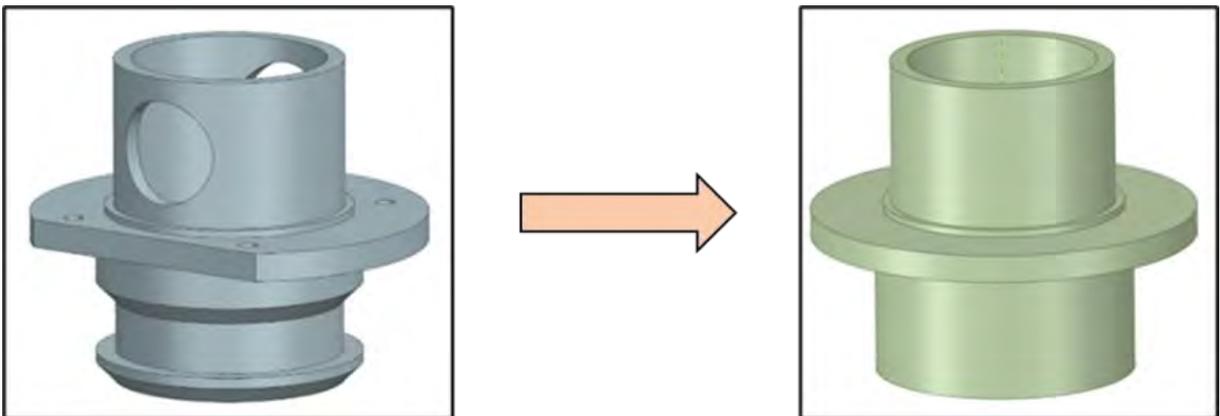


Abbildung 51: Darstellung der Buchse vor und nach der Vereinfachung

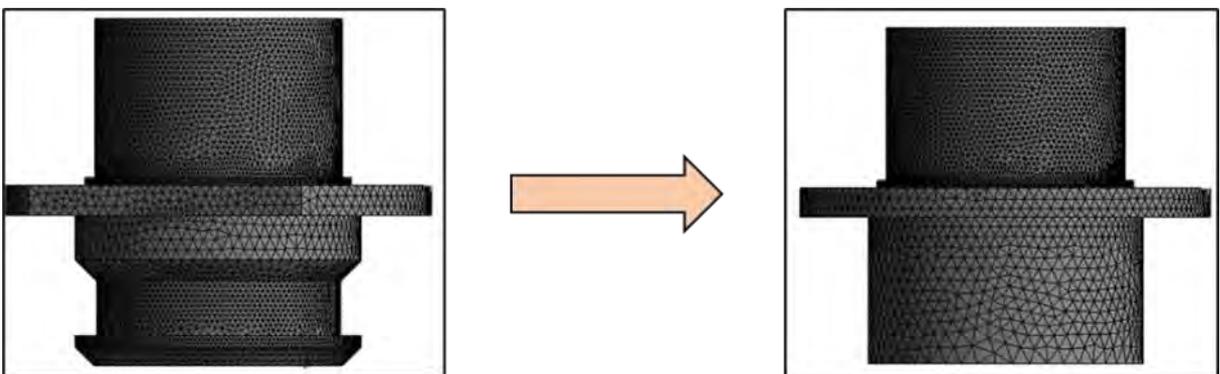


Abbildung 52: Vergleich der Netzstruktur der Buchse vor und nach der Vereinfachung

Für die statische Berechnung des FEM-Modells müssen einige Maßnahmen vorgenommen werden. Zuerst muss dem Modell Material zugewiesen werden. Der Werkstoff der einzelnen Platten sowie der Buchsen ist als Aluminiumlegierung definiert, die Stempel als Kupfer-Zink-Legierung (Abbildung 53). Des Weiteren sind die Berührungspunkte zwischen den Bauteilen, aufgrund der Schraubverbindungen, als Verbundkontakte festgelegt. Diese vereinfachte Annahme ist für das vorliegende Modell ausreichend, da beispielsweise bei reibungsbehafteten Kontakten die Reibung berücksichtigt werden muss und dadurch der Berechnungsaufwand höher wird. Das vorliegende Modell weist insgesamt 21 Verbundkontakte auf.

Die Vernetzung des Modells wird mit zwei Optionen durchgeführt. Zum einen wird bei den Platten die Vernetzung manuell gewählt, da das Verhalten der Platten bei einer statischen Belastung anhand von unterschiedlichen Elementgrößen untersucht werden soll. Für die Buchsen und Stempel wird eine automatische Annäherung über die Option „Proximity“ durchgeführt, sodass das Programm selbstständig eine ausreichende Vernetzung generiert. Allgemein gilt eine Netzstruktur als optimal, wenn mindestens drei Elemente über die Dicke der einzelnen Körper gelegt werden. [4]

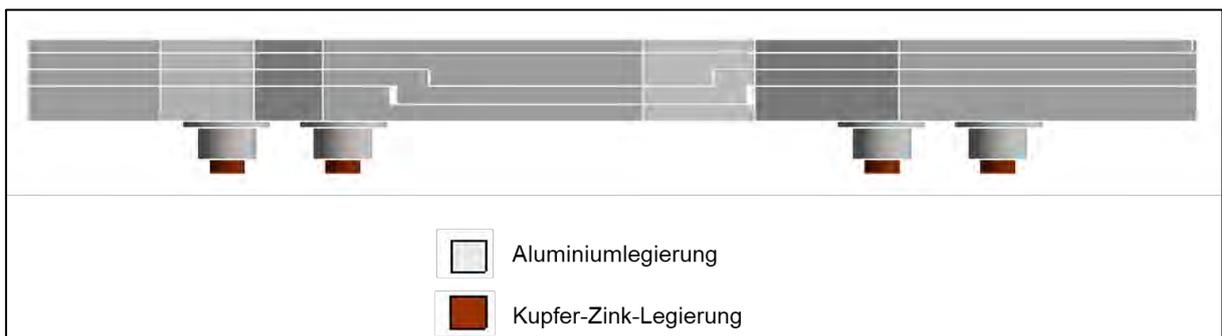


Abbildung 53: Werkstoffzuweisung der Girderjustiereinheit

Für die Vereinfachung des Modells wurde die Magnetstruktur durch eine angreifende Kraft ersetzt. Dafür wurde eine Skizze erstellt, die den exakten Grundriss der Magnetstruktur wiedergibt. Auf diese Fläche wurde eine senkrechte Kraft mit 5377 N angesetzt, welche die Last der Magnetstruktur repräsentieren soll (Abbildung 54). In den Anforderungen soll genau diese Last die Mindesttragfähigkeit der Girderjustiereinheit sein, welche in Kapitel 5.1.2 und in Kapitel 5.2 geprüft werden soll. Zusätzlich wurde die Erdbeschleunigung $g = 9,8066 \frac{m}{s^2}$ für die statische Berechnung berücksichtigt. Die Auflager- und Federstempel wurden jeweils über eine Remote-Verschiebung definiert. Das bedeutet, dass Verschiebungen und Rotationen individuell an beliebigen Punkten des Modells festgelegt werden können [34]. In diesem Modell wurde der Mittelpunkt der Unterseite der Stempel ausgewählt und die Verschiebungen in X-, Y- und Z-Richtung verhindert, sodass keine Bewegung längs der Achsen möglich ist. Die rotatorischen Freiheitsgrade um X, Y und Z werden zugelassen.

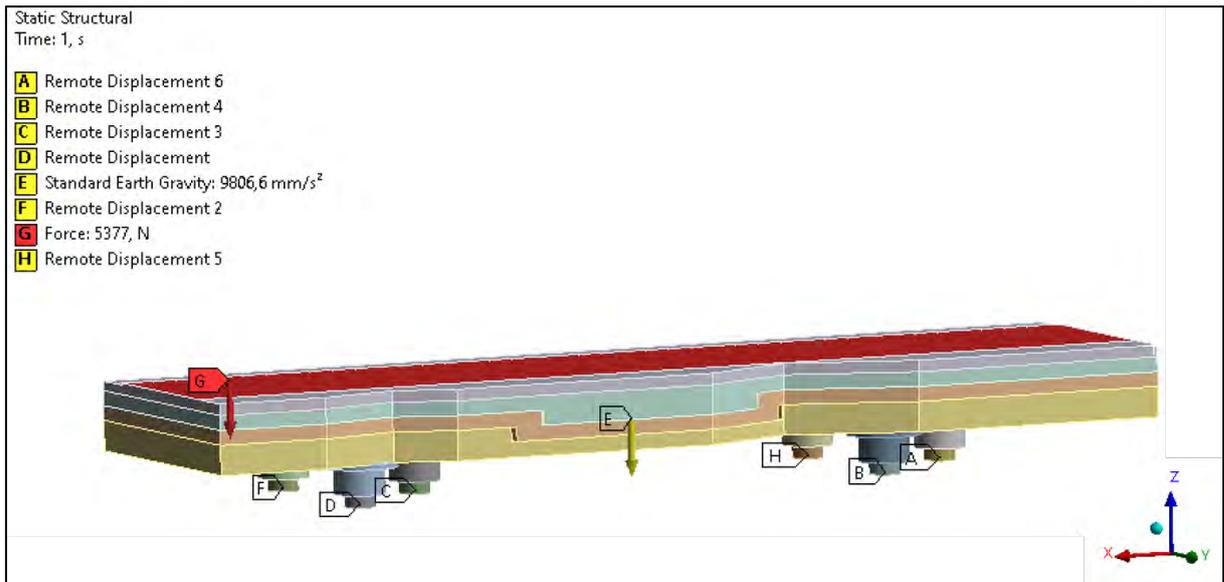


Abbildung 54: Darstellung der Randbedingungen und angreifenden Kraft

5.1.1 Netzstudie

Die Netzstudie gibt Aufschluss über den Zusammenhang zwischen der Elementgröße und der Verformung und somit eine Aussage über die Annäherung des Verformungswertes an einen theoretischen genauen Wert. Auf das vorliegende Modell aus Kapitel 5.1 wird die Netzstudie mit fünf unterschiedlichen Elementgrößen angewendet. Die fünf Varianten der Netzverfeinerung werden ausschließlich an den Platten durchgeführt, um die Deformation mit möglichst wenig Elementen ausreichend genau abbilden zu können und somit eine effiziente Optimierung der Stempelpositionen zu ermöglichen. Wie bereits erwähnt, werden die Buchsen und Stempel anhand einer automatischen Vernetzung generiert, um eine ausreichende, feine Darstellung zu erzielen. In der ersten Variante der Netzstudie wird für das Modell eine grobe Vernetzung mit einer Elementgröße von 30 mm erzeugt. In der Abbildung 55 wird dieses grafisch aufgeführt. Die zugehörige Verformung kann aus der Abbildung 56 und der Tabelle 4 entnommen werden. In der untenstehenden Tabelle 4 werden die Varianten der unterschiedlichen Elementgrößen und deren zugehörige Verformung dargestellt. Im Anhang A-1.1 sind die weiteren Resultate der Durchführungen hinterlegt.

Variante	Elementgröße [mm]	Verformung [μm]
1	30	2,6923
2	15	2,7188
3	10	2,7687
4	5	2,7721
5	2,5	2,7805

Tabelle 4: verschiedene Elementgrößen und deren zugehörige Verformung

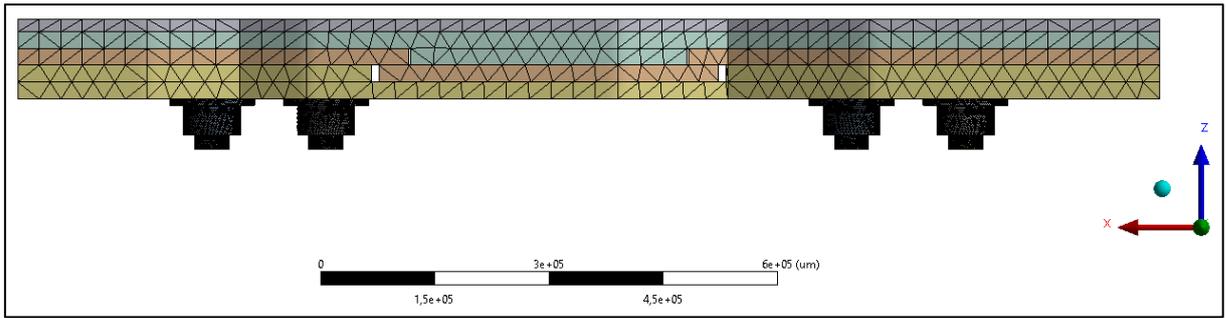


Abbildung 55: Vernetzung der Platten mit einer Elementgröße von 30 mm

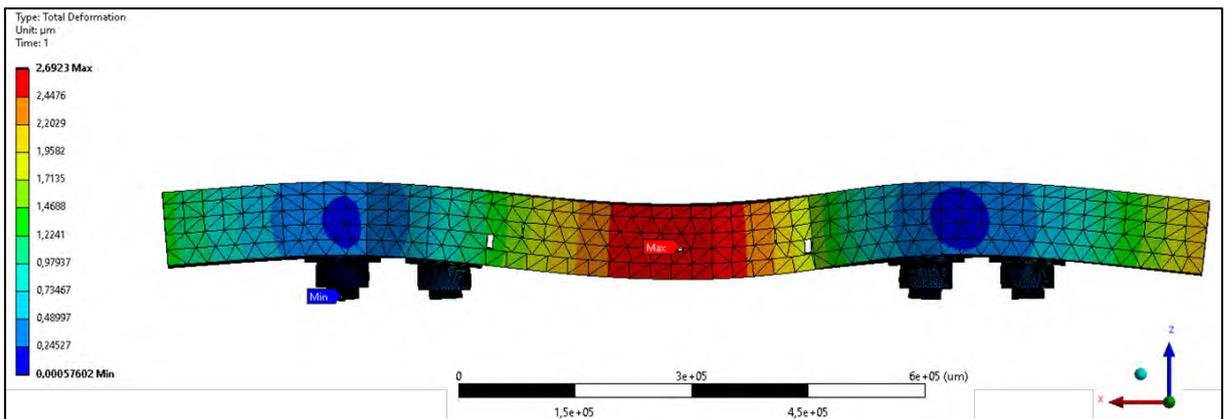


Abbildung 56: Verformung mit einer Vernetzung mit einer Elementgröße von 30 mm

Die Abbildung 57 zeigt die grafische Darstellung der Ergebnisse der Netzstudie. Es wird die Verformung in Abhängigkeit der Elementgröße gesetzt. Aus dem Diagramm kann entnommen werden, dass mit Verfeinerung der Elementgröße, die prozentuale Änderung zwischen den Vernetzungsstufen sinkt. Das bedeutet, dass eine dichtere Vernetzung genauere Lösungen über die Verformungen liefert. Anhand der Grafik ist zusätzlich erkennbar, dass die Ergebnisse gegen einen Wert konvergieren. Die Ergebnisse nähern sich mit jeder Netzverfeinerung einem Grenzwert an. Die in der Tabelle 5 vorliegenden Werte zeigen die prozentuale Änderung zwischen den Verformungen in Abhängigkeit der Elementgrößen. Für die weitere Analyse der Verformungen und Spannungen wird das FEM-Modell mit der Netzstruktur gewählt, die eine Elementgröße von 10 mm besitzt. Ab dieser Elementgröße ist die prozentuale Änderung zur nächsten Verfeinerungsstufe sehr gering. Die Ergebnisse sind für weitere Beurteilungen ausreichend und die Berechnungszeit kann gering gehalten werden.

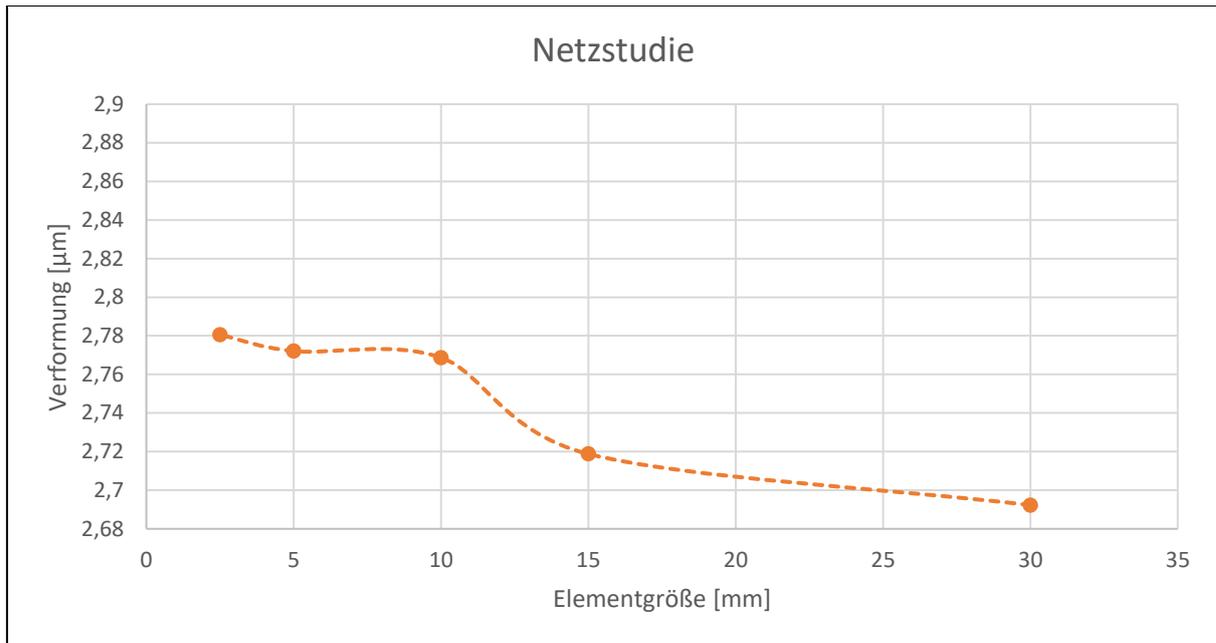


Abbildung 57: Netzstudie – Verformung in Abhängigkeit der Elementgröße

Variante	Abweichung
1→2	0,98%
2→3	1,84%
3→4	0,12%
4→5	0,30%

Tabelle 5: Abweichungen zwischen den Varianten

5.1.2 Auftretende Verformungen an der Justiereinheit

Die folgende Abbildung 58 sowie die Abbildung 59 zeigen die auftretenden Verformungen bei einer Last von 5377 N. Aus der Darstellung ist zu entnehmen, dass die Verformung in der Mitte der Justiereinheit am größten ist. Das ist der Fall, da die Justiereinheit mittig nicht gestützt wird. Die Verformungen befinden sich im Mikrometerbereich. Weitere Fehlstellungen werden über die Justierung der Magnete ausgebessert. Die minimalen Verformungen treten an den Auflager- und Federstempeln auf. In der Analyse wurde an den äußeren Kanten der Baugruppe jeweils ein manueller Messpunkt zur genaueren Beurteilung der Verformung erstellt. Anhand der beiden Werte fällt auf, dass die rechte Seite der Justiereinheit eine stärkere Verformung erfährt als die linke. Der Grund hierfür ist die asymmetrische Aufstellung der Auflager- und Federstempel in der Y-Richtung (siehe Abbildung 34). Des Weiteren findet eine leicht stärkere Verformung an der Seite mit den Schrägen in Z-Richtung statt, da diese die Steifigkeit der Justiereinheit an dieser Stelle vermindern (Abbildung 58 und Abbildung 59). Die Verformung beträgt etwa 200 nm und kann daher vernachlässigt werden.

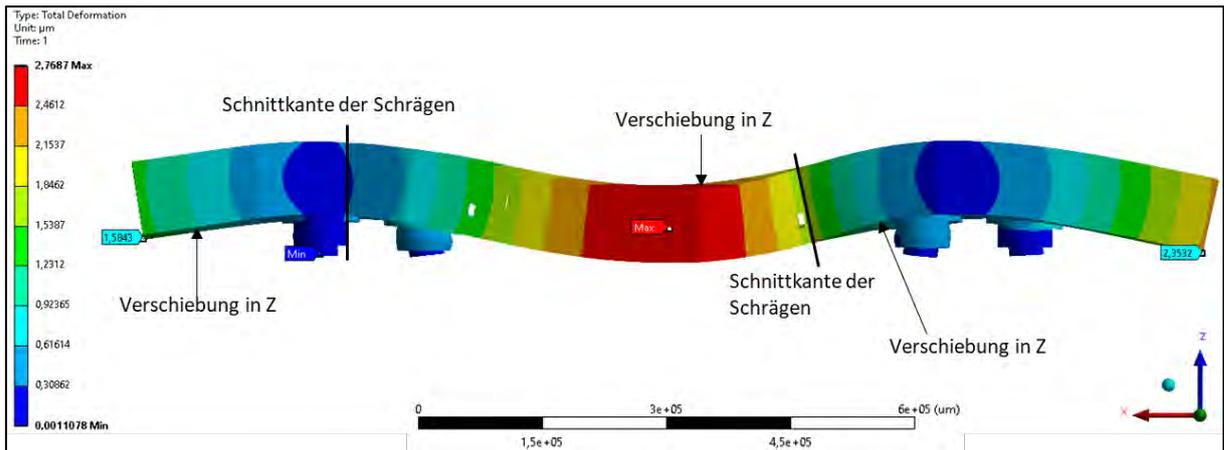


Abbildung 58: Verformungen bei einer Vernetzung mit einer Elementgröße von 10 mm

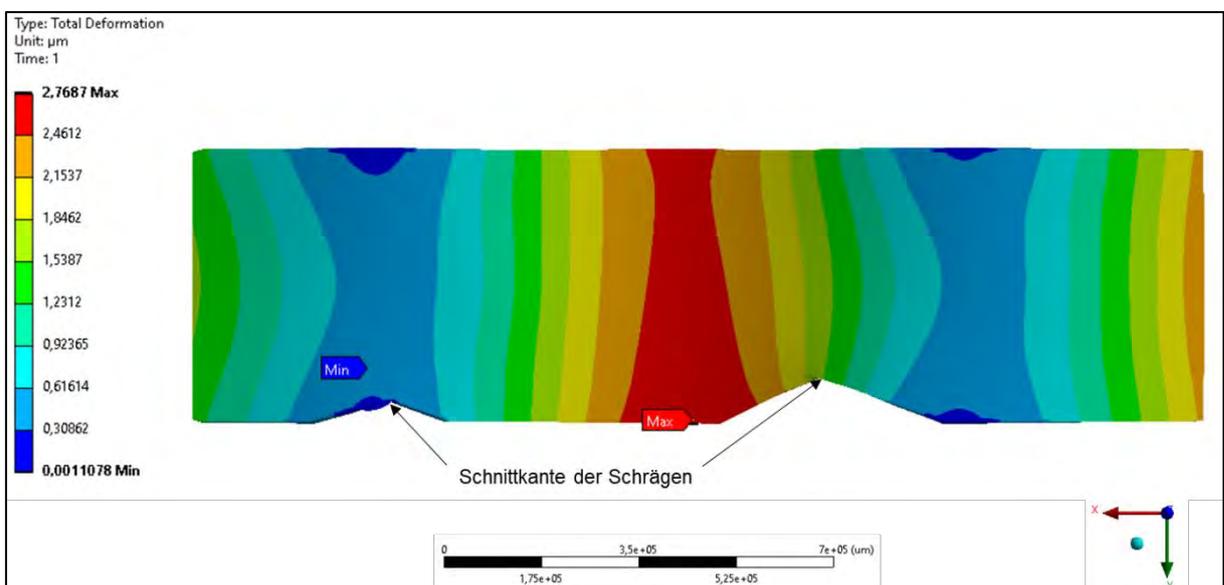


Abbildung 59: Darstellung der Verformung in Richtung Z-Achse

Wie bereits in Kapitel 4.1.1 unter dem Punkt „Aufstellvarianten der Auflager- und Federstempel“ erläutert, lässt sich die größere Durchbiegung in der Mitte auf die Positionierung der Auflager- und Federstempel zurückführen, die in Anlehnung an das Prinzip von Bessel ausgelegt worden sind. Dieses Prinzip stellt aber nicht die optimale Lösung für die Stempelpositionierung dar, da nach Bessel zwei Auflager und in dieser Arbeit sechs Auflager verwendet werden.

Trotz der minimal abweichenden Durchbiegungen wurde eine Optimierung der Stempelpositionen vorgenommen, um die Verformung in der Mitte der Justiereinheit zu reduzieren. Hierfür wurden die Stempel in 5 mm Schritten zur Mitte verschoben. Das beste Ergebnis ergab sich bei einer Verschiebung um 15 mm. Die Position der Stempel ist somit bei etwa 345 mm von der Außenkante bezogen auf die Plattenlänge von 1500 mm. Gemessen von der Außenkante entspricht das einer Positionierung von 23% der Gesamtlänge. Die

Verformung nach der Optimierung (Abbildung 60) weicht zwischen der Mitte der Justiereinheit und der linken Kante nur noch um $0,023\ \mu\text{m}$ anstatt um $1,18\ \mu\text{m}$ ab. Die rechte Kante hat stattdessen eine stärkere Durchbiegung als zuvor. Um die Durchbiegungen anzugleichen, könnten die Auflager- und Federstempel weiter nach rechts verschoben werden. Da sich die Verformungen der optimierten Lösung in einem sehr geringen Bereich befinden, wird hierfür die Verformungsanalyse für die Justiereinheit mit integrierter Magnetstruktur durchgeführt.

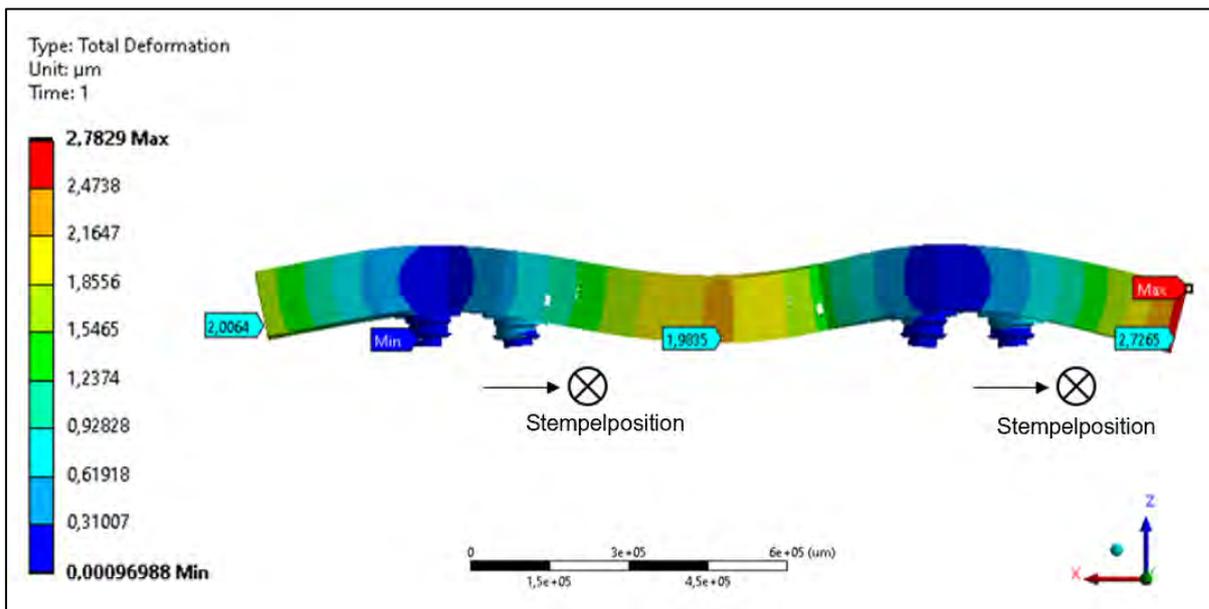


Abbildung 60: Optimierte Verformung bei Verschiebung der Stempel um $15\ \text{mm}$ und erneut mögliche Verschiebung der Stempelposition

In der nachfolgenden Abbildung 61 wird die Justiereinheit gezeigt, nachdem die Magnete als vereinfachte Körper mit ihrer Steifigkeit und ihrer Masse hinzugefügt wurden. Die Magnetstruktur wurde für die bessere Übersichtlichkeit der Verformungen ausgeblendet (Abbildung 62). Bei der Verformung ist deutlich zu erkennen, dass die Durchbiegung in der Mitte der Baugruppe sowie an der rechten Kante einen Maximalwert von $1,0388\ \mu\text{m}$ aufweist. Der Grund für die erhöhte Durchbiegung in der Mitte ist die geringe Stabilität, da sich an dieser Position keine Abstützung befindet. Dies gilt gleichermaßen für die rechte Außenkante. Der Grund für diese Verformung, ist die asymmetrische Aufstellung in der Y-Richtung der Auflager- und Federstempel. Beim Vergleichen der maximalen Verformungen aus Abbildung 58 und Abbildung 62 ist festzustellen, dass sich die Verformungen mit montierter Magnetstruktur verringert haben. Der Grund hierfür ist, dass die Magnetstruktur durch den Verbundkontakt mit der Justiereinheit versteifend wirkt. Die maximalen Verformungen sind sehr gering. Restfehler, werden bei der weiteren Montage über die Magnete ausgeglichen.

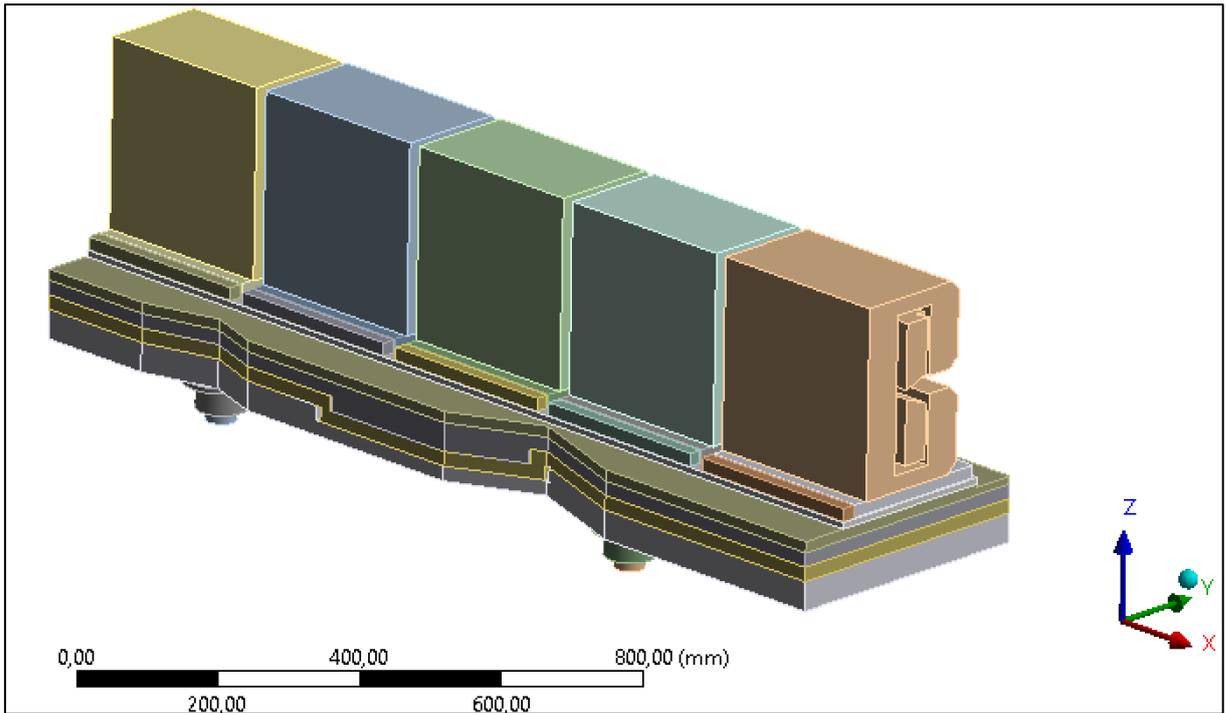


Abbildung 61: Justiereinheit mit integrierter Magnetstruktur

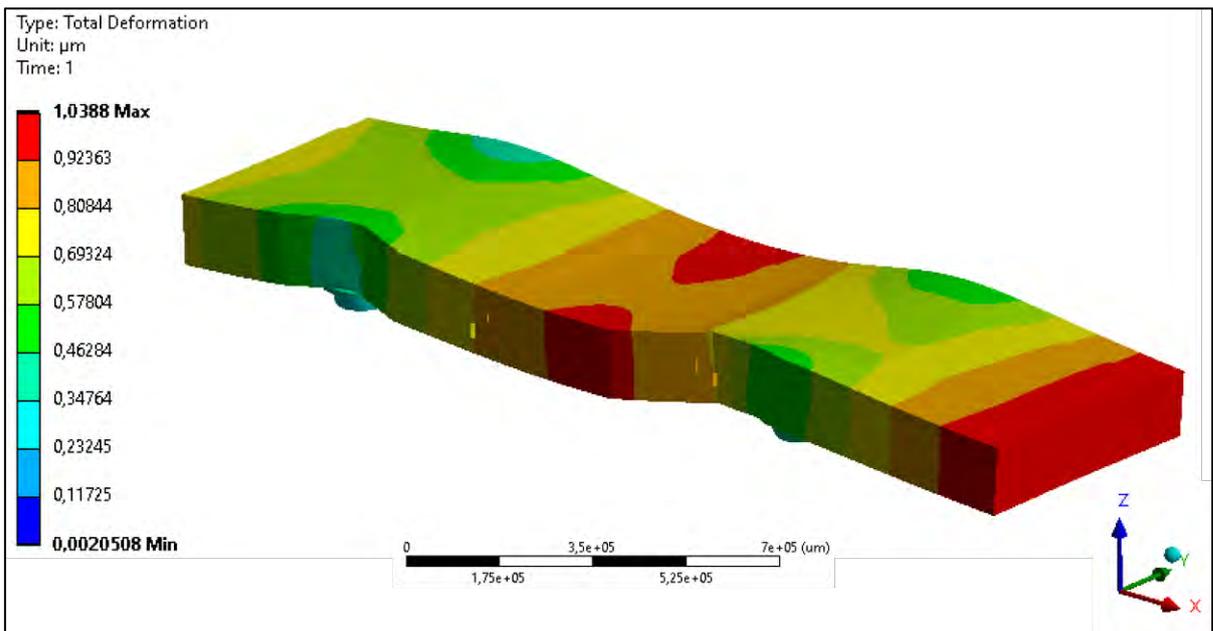


Abbildung 62: Verformung der Platten der Justiereinheit nach Hinzukommen der Magnetstruktur

5.1.3 Auftretende Spannungen

Die nachstehende Abbildung 63 zeigt die auftretenden Spannungen der Justiereinheit, die unter dem Eigengewicht und des Gewichts der Magnetstruktur, die auch hier ausgeblendet wurde, auftreten. Es kann festgestellt werden, dass die Spannungen in den Platten mit maximal 0,355 MPa relativ gering im Verhältnis zu der Mindeststreckgrenze von 110 MPa der Aluminiumlegierung sind. Die FEM-Analyse zeigt, dass die größten Vergleichsspannungen an

den Buchsen auftreten. In der Abbildung 64 ist die maximale Verformung einer Buchse dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich diese an einer Kante befindet. Der Grund hierfür ist eine geometriebedingte Singularität zwischen dem Übergang der einen Kante zur anderen. Das bedeutet, dass an diesem Grenzpunkt bei weiterer Netzverfeinerung kein Endwert erreicht wird, sondern die Spannungen immer weiter ansteigen. Um dem entgegenzuwirken kann der 90° Winkel mit einem kleinen Radius bearbeitet werden. [35]

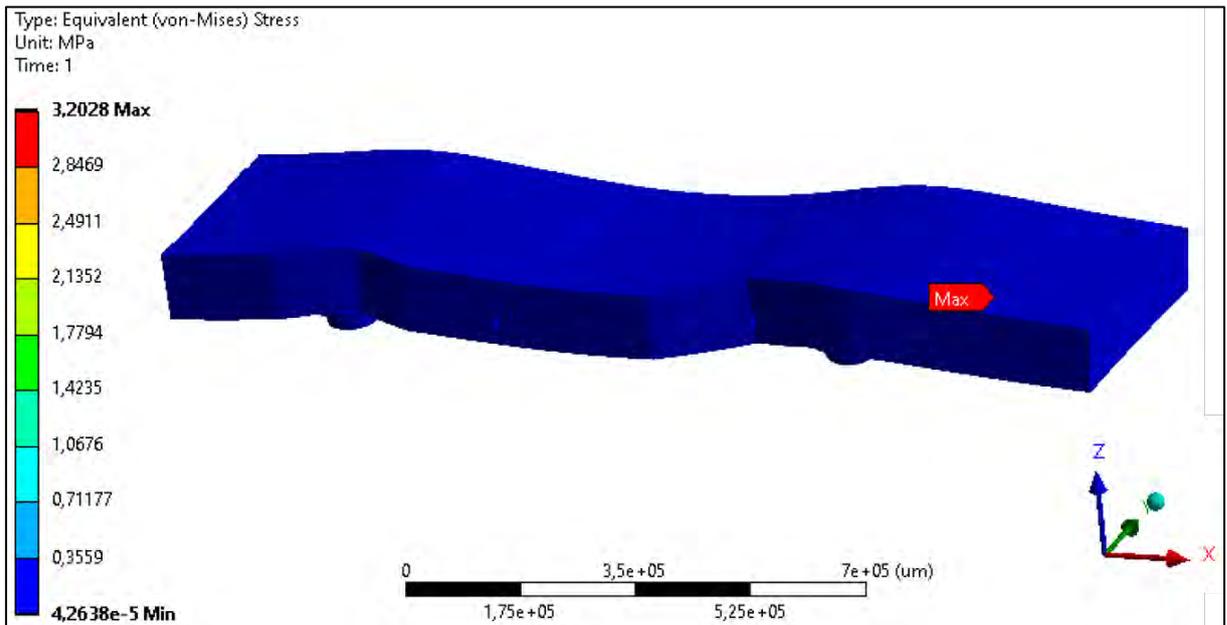


Abbildung 63: Auftretende Spannungen in der Justiereinheit unter Last der Magnetstruktur

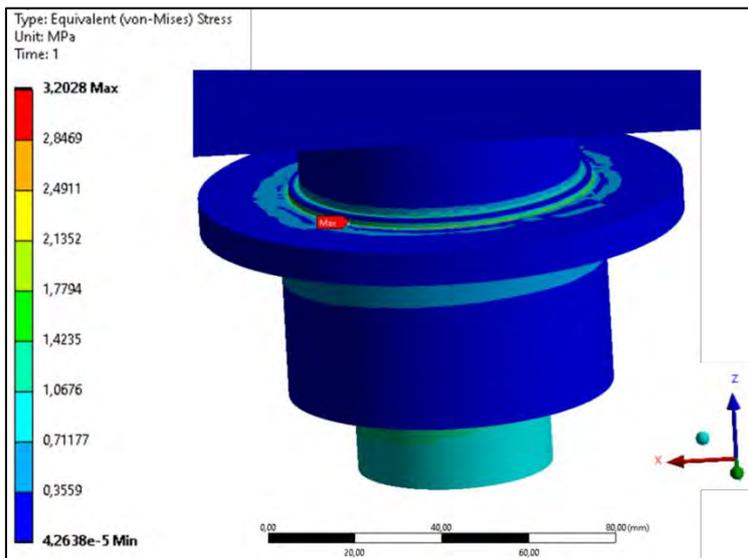


Abbildung 64: Maximale Verformung an der Buchse

5.2 Modalanalyse

Für die Ermittlung der Eigenfrequenzen und deren zugehörigen Eigenformen wird die Justiereinheit zuerst einzeln betrachtet. Hierfür wird das vereinfachte Modell mit den bereits bestehenden Randbedingungen sowie der Vernetzungsstruktur mit einer Elementgröße von 10 mm aus dem Kapitel 5.1 herangezogen.

Anhand der Modalanalyse werden die ersten 12 Eigenfrequenzen ermittelt, die in der Tabelle 6 aufgeführt werden. Laut der Anforderungsliste soll die erste Eigenfrequenz 100 Hz betragen. Diese Forderung wird laut der Analyse erfüllt.

Eigenmode	Frequenz [Hz]
1	454,49
2	462,67
3	506,82
4	567,8
5	742,52
6	770,51
7	831,96
8	928,31
9	928,02
10	1411,2
11	1525,9
12	1621,1

Tabelle 6: Eigenfrequenzen der Justiereinheit

In der untenstehenden Abbildung 65 und der Abbildung 66 ist die Eigenform der ersten Eigenfrequenz von 454,49 Hz dargestellt. Hieraus kann festgestellt werden, dass die Justiereinheit eine sinusförmige Schwingung entlang der X-Achse ausführt. Eine mögliche Ursache stellen die Randbedingungen an den Auflager- und Federstempeln dar. Diese wurden in den translatorischen Raumrichtungen X, Y und Z fixiert. Die rotatorischen Freiheitsgrade um die jeweiligen Raumrichtungen sind frei beweglich. Aufgrund dieser Bedingungen führen die Stempel eine rotatorische Bewegung um die Y-Achse aus, da das System in diese Richtung die geringste Steifigkeit besitzt.

Weitere Ergebnisse aus der Modalanalyse sind im Anhang A-1.2 hinterlegt.

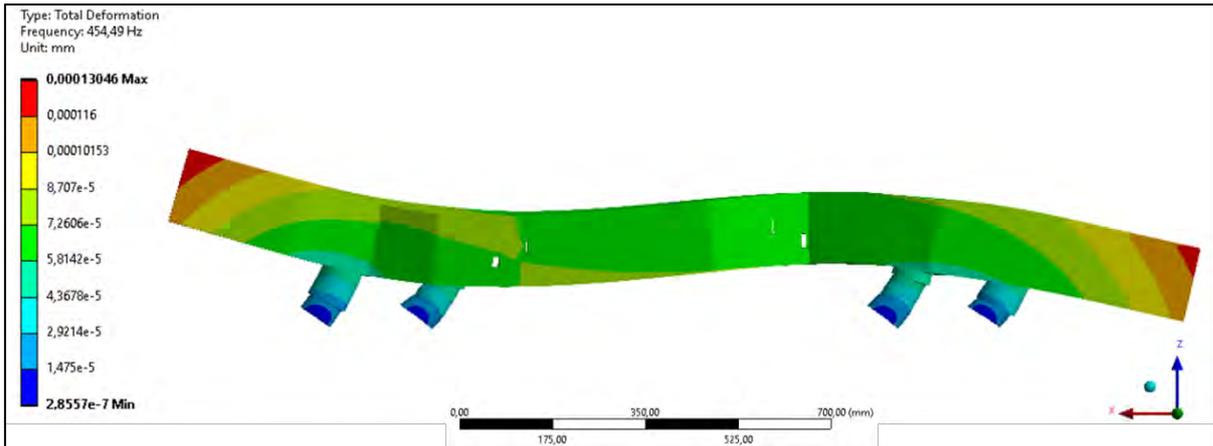


Abbildung 65: Vorderansicht der Eigenform der ersten Eigenfrequenz von 454,49 Hz

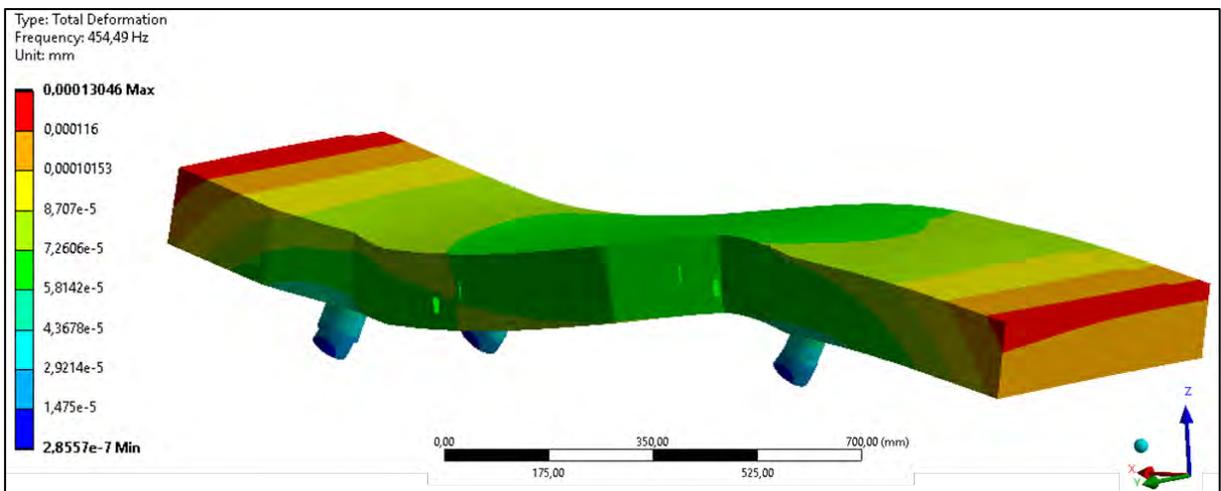


Abbildung 66: Eigenform der ersten Eigenfrequenz von 454,49 Hz

Eine weitere Simulation mit der Magnetstruktur zeigt, dass sich die Eigenfrequenzen im Allgemeinen verringert haben (Tabelle 7). Der Grund dafür ist, dass die Masse der Magnetstruktur von 537,7 kg mit einberechnet wurde. Die Eigenfrequenzen werden durch die zusätzliche Masse beeinflusst. Ausschlaggebend ist bei der Betrachtung auch hier wieder die erste Eigenfrequenz. Diese beträgt 159,88 Hz. Wird jeweils die erste Eigenfrequenz aus beiden Modalanalysen miteinander verglichen, so ist erkennbar, dass sich die Eigenfrequenz um ca. 65% verringert hat.

Eigenmode	Frequenz [Hz]
1	159,88
2	196,72
3	233,01
4	362,37
5	410,55
6	438,85
7	513,52
8	531,46
9	571,15
10	621,07
11	693,91
12	814,4

Tabelle 7: Eigenfrequenzen der Justiereinheit mit montierter Magnetstruktur

Die Abbildung 67 und Abbildung 68 stellt die erste Eigenform dar, die aus der zusätzlichen Masse resultiert. Bei der Betrachtung ist festzustellen, dass sich die Schwingungsform aufgrund des Gewichts verändert hat. Es findet eine Überlagerung zweier Schwingungsformen statt. Einerseits erfolgt eine Torsion um die X-Achse, da die Stempelposition auf dieser Seite eine geringere Steifigkeit garantiert. Zeitgleich findet eine Torsion um die Z-Achse statt. Diese ist aufgrund der besseren Stempelposition verhältnismäßig gering, wodurch an dieser Stelle eine Art Drehpunkt entsteht.

Die Modalanalyse zeigt, dass die entwickelte Konstruktion bei montierter Magnetbaugruppe die Anforderung der ersten Eigenfrequenz von mindestens 100 Hz erfüllt und somit für eine Belastung von 537,7 kg geeignet ist. Bei Änderung der Magnetstruktur, insbesondere bei einer Vergrößerung der Masse, sollte erneut eine Analyse des Schwingungsverhaltens durchgeführt werden.

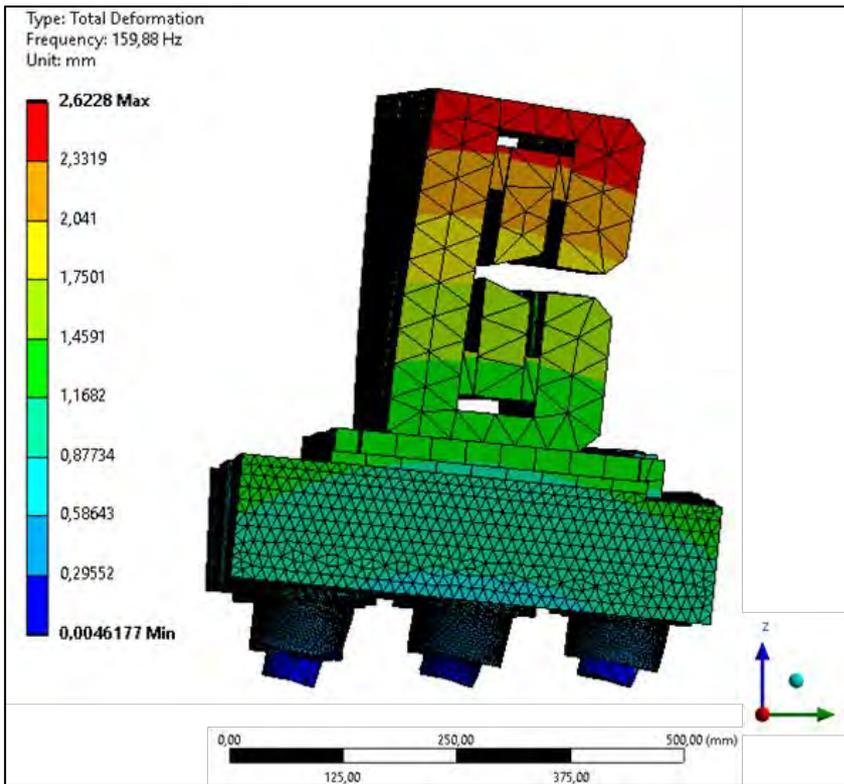


Abbildung 67: Seitenansicht der Eigenform der ersten Eigenfrequenz von 159,88 Hz

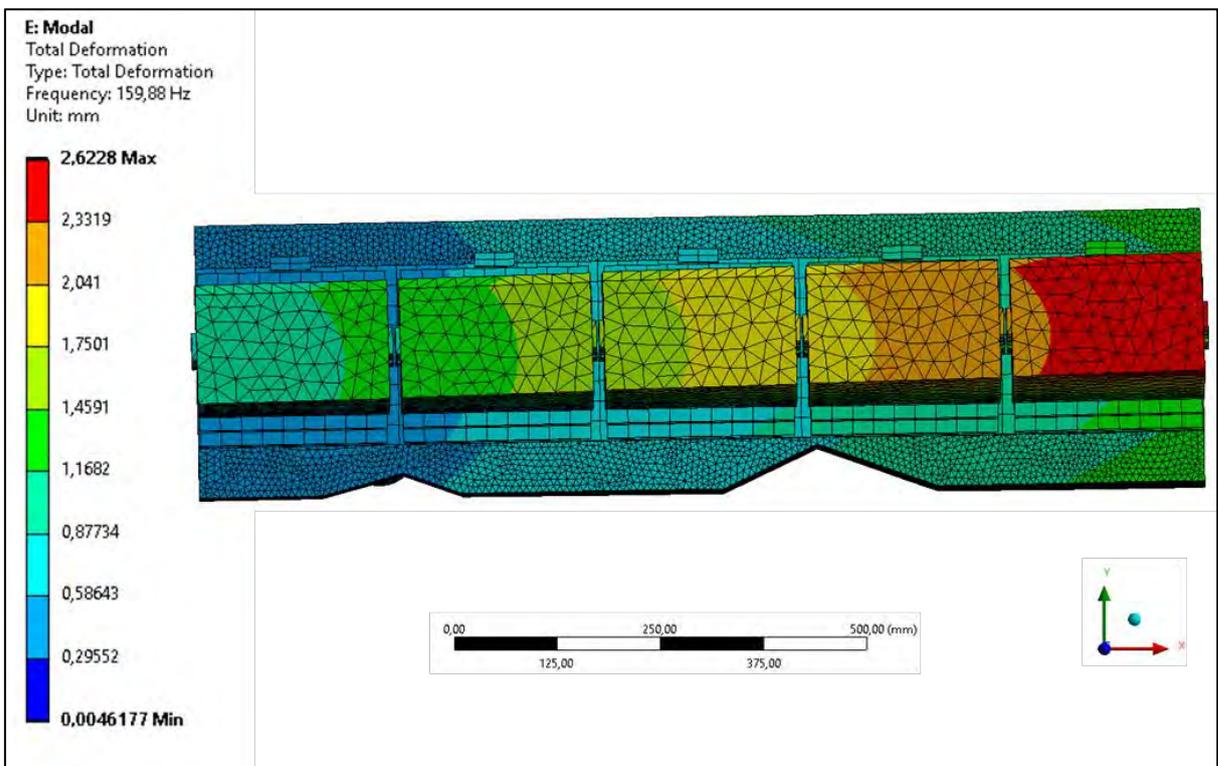


Abbildung 68: Draufsicht der Eigenform der ersten Eigenfrequenz mit 159,88 Hz

6 Zusammenfassung

Mit dieser Bachelorthesis wurde das Ziel verfolgt, eine Girderjustiereinheit für DL-Ablenkmagnete zu konzipieren und zu konstruieren. Im ersten Schritt wurde sich ein Überblick über mögliche Justiersysteme verschafft, die für Positionierungen von Komponenten eingesetzt werden. Anschließend wurden Anforderungen und Wünsche an die zu entwickelnde Girderjustiereinheit zusammengetragen und in einer Anforderungsliste festgehalten. Mit Hilfe eines morphologischen Kastens wurden aus den zuvor ermittelten Teilproblemlösungen Lösungsvarianten erarbeitet und in einer anschließenden Lösungsbewertung auf die Forderungen aus der Anforderungsliste geprüft. Mittels einer Rangfolgegewichtung wurden die Wünsche aus der Anforderungsliste priorisiert und jeweils der Gewichtungsfaktor ermittelt, der bei einem folgenden Wertigkeitsverfahren mit einfließt.

Anhand der Bewertungsverfahren konnte eine optimale Lösung für die bestehenden Anforderungen konstruktiv ausgearbeitet werden. Die entwickelte Girderjustiereinheit ermöglicht eine präzise und stufenlose Positionierung, die motorisch über Antriebspindeln und Nutensteine erreicht wird. Durch eine Lineareinheit ist ein seitliches Herausfahren der Gesamtbaugruppe gegeben. Die Endlagen werden über eine Schraube und eine Mutter erfasst. Zudem ermöglicht das Konzept sechs Freiheitsgrade, in die jeweils bis zu $\pm 7,5$ mm verfahren werden kann. Aufgrund des Einsatzes von Magneten bestehen die Platten der Justiereinheit aus einer Aluminiumlegierung, um das Magnetfeld und den Elektronenstrahl nicht zu beeinflussen. Zusätzlich erfüllt die Girderjustiereinheit die Anforderung einer maximalen Bauhöhe von 223 mm, die durch die Verwendung der Nutensteine eingehalten wird.

Es wurden drei Varianten erstellt, wie die Auflager- und Federstempel unter der Justiereinheit positioniert werden können, um eine bestmögliche Verformung zu erhalten. Eine statisch-mechanische FEM-Analyse hatte ergeben, dass die Stempelpositionierung optimiert werden muss. Außerdem resultierte aus der Analyse, dass sich die Verformung durch das zusätzliche Gewicht der montierten Magnetstruktur verringert. Die größte Verformung liegt bei $1,0388 \mu\text{m}$, was bedeutet, dass eine Tragfähigkeit von 537,7 kg sichergestellt wird.

Durch die Modalanalyse konnte festgestellt werden, dass sich die erste Eigenfrequenz der Justiereinheit mit montierter Magnetstruktur um 65% verringert hat. Das liegt an der zusätzlichen Masse der Magnete. Die erste Eigenfrequenz beträgt dennoch 159,88 Hz und erfüllt somit die Mindestanforderung von 100 Hz. Somit zeigt auch die Modalanalyse, dass die Justiereinheit die Belastung von 537,7 kg aufnehmen kann. Die Aufgabenstellung konnte somit durch die vorliegende Konstruktion erfüllt werden.

7 Ausblick

Die FEM-Analyse hat ergeben, dass die größten Verformungen in der Mitte der Baugruppe sowie an der rechten äußeren Kante auftreten. Eine Möglichkeit, eine gleichmäßige Durchbiegung der Justiereinheit zu erreichen, wäre eine Neuordnung der Auflager- und Federstempel, sodass auch in der Y-Richtung eine Symmetrie gegeben ist. Eine weitere Überlegung wäre die Anbringung von zusätzlichen Versteifungen bzw. Stempeln in der Mitte und an der Außenkante der Justiereinheit.

Nach der Ausarbeitung der Bachelorarbeit hat sich eine Änderung bezüglich der Magnetstruktur ergeben. Zukünftig soll die Magnetstruktur aus vier und sechs Modulen zusammengesetzt werden. Das hat zur Folge, dass die Girderjustiereinheit kleiner bzw. größer dimensioniert und somit erneut eine statisch-mechanische Analyse sowie eine Modalanalyse durchgeführt werden muss. Gleichmaßen gilt die Überprüfung der Verformungen und Eigenfrequenzen, wenn die Masse der Magnetstruktur geändert werden sollte.

Bis Ende 2021 soll der erste Prototyp der Girderjustiereinheit fertiggestellt werden.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Deutsches Elektronen-Synchrotron: Über DESY.
Online im Internet: URL: https://www.desy.de/ueber_desy/desy/index_ger.html
(Abgerufen: 20.08.2021)

- [2] Landschaft der Forschungsinfrastruktur: Luftbild des Forschungszentrums DESY in Hamburg.
Online im Internet: URL: https://fis-landschaft.de/media/?tx_wdpmedia_pi2%5Bimage%5D=5860&tx_wdpmedia_pi2%5Baction%5D=image&tx_wdpmedia_pi2%5Bcontroller%5D=Gallery&cHash=d3af3c58684facecb35db5660067d85a
(Abgerufen: 20.08.2021)

- [3] Deutsches Elektronen-Synchrotron: PETRA III.
Online im Internet: URL:
https://www.desy.de/forschung/anlagen__projekte/petra_iii/index_ger.html
(Abgerufen: 20.08.2021)

- [4] Interne Datenkommunikation/ Datenquelle

- [5] Schroer, Christian G.: PETRA IV.
Interne PowerPoint Präsentation, gehalten am 25.01.2019

- [6] G. Le Bec, J. Chavanne: Magnets for the ESRF upgrade phase II
PowerPoint Präsentation, gehalten im November 2014

- [7] Ramm, T.: Konstruktion/ Entwicklung des Lenkergestells mit integrierter Magnetstruktur
veröffentlicht: 19.05.2021

- [8] Physik für alle!: Dipolmagnet.
Online im Internet: URL: <https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Dipolmagnet>
(Abgerufen: 23.08.2021)

- [9] Physik für alle!: Quadrupolmagnet.
Online im Internet: URL: <https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Quadrupolmagnet>
(Abgerufen: 23.08.2021)

- [10] Saemann, E.-O.; Platzer, R.: EASy (Easy Alignment System) 6-Achs-Präzisionspositionierung.
Interne PowerPoint Präsentation, gehalten am 12.12.2019

- [11] Platzer, R.: Microsoft Excel: Gestelle Vergleich.
Stand: [2016/ 04/ 07]

- [12] Platzer, R.: EASy (Easy Alignment System) 6-Achs-Präzisionspositionierung.
Interne PowerPoint Präsentation, gehalten am 26.08.2020

- [13] Platzer, R.: Foto EASy A3.
Interne Fotos
(Abgerufen: 30.08.2021)
- [14] Direct Industry: Kataloge: Nivell.
Online im Internet: URL: <https://pdf.directindustry.de/pdf/nivell/catalogue-nivell-version-german/111389-630035.html#open1848119>
(Abgerufen: 15.09.2021)
- [15] Direct Industrie: Produkttrends: Nivell.
Online im Internet: URL: <https://trends.directindustry.de/nivell/project-111389-124585.html>
(Abgerufen: 15.09.2021)
- [16] HUBER Diffractionstechnik GmbH & Co. KG: Lineartische
Online im Internet: URL: <https://www.xhuber.com/de/produktsammlung/1-komponenten/11-translation/111-lineartische/>
(Abgerufen: 15.09.2021)
- [17] Hoder, Hilmar: Skript: Methodische Produktentwicklung.
Stand: [Sommer 2017, 11.Auflage]
- [18] Bach GmbH: T-Nutenstein.
Online im Internet: URL: <https://www.bachgmbh.de/T-Nutenstein-M-12-fuer-Nut-14-mm#false>
(Abgerufen: 08.10.2021)
- [19] Wikipedia: Geradführung: Rundstange und Buchse.
Online im Internet: URL:
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/62/Linear-table_animated.gif
(Abgerufen: 08.10.2021)
- [20] THK: Linearachsen.
Online im Internet: URL: <https://www.thk.com/?q=de/node/5066>
(Abgerufen: 08.10.2021)
- [21] August Steinmeyer GmbH & Co. KG.: Präzisions-Kugelgewindetriebe.
Online im Internet: URL: https://www.steinmeyer.com/de/produkte/praezisions-kugelgewindetriebe/einzelmutter-mit-4-punkt-kontakt/?tx_nwproducts_products%5Bproduct%5D=415&cHash=8710eb1aee58fed2ac622aa35cc00023
(Abgerufen: 08.10.2021)
- [22] THK: Kreuzrollenlager.
Online im Internet: URL: <https://www.thk.com/?q=de/node/5083>
(Abgerufen: 08.10.2021)

- [23] Kalitec Verbindungstechnik: Spindel mit Mutter.
Online im Internet: <https://www.kabelschuhe-shop.de/SW-Stahl-94900L-13-Spindel-mit-Mutter-M16-x-15-mm>
(Abgerufen: 08.10.2021)
- [24] SensoPart Industriesensorik GmbH: Induktive Sensoren.
Online im Internet: <https://www.sensopart.com/de/produkte/induktive-sensoren/>
(Abgerufen: 08.10.2021)
- [25] SensoPart Industriesensorik GmbH: Lasersensor/ Abstandssensor
Online im Internet: <https://www.sensopart.com/de/produkte/details/624-41004/>
(Abgerufen: 08.10.2021)
- [26] Smalley: Wellenfedern.
Online im Internet: URL: https://www.smalley.com/de/wellenfedern?gclid=EAlaIQobChMIqtGA9LL38wIVpQV7Ch3irQvxEAAYASAAEgJAZ_D_BwE
(Abgerufen: 25.10.2021)
- [27] Smalley: Wellenfedern.
Online im Internet: URL: <https://www.smalley.com/de/wave-spring/cms55-l1>
(Abgerufen: 25.10.2021)
- [28] Crushtymks: Schrittmotor.
Online im Internet: URL: <https://crushtymks.com/electric-motor/186-few-words-about-stepper-motor-advantages-disadvantages-and-classification.html>
(Abgerufen: 25.10.2021)
- [29] Konstruktionspraxis: Planetengetriebe.
Online im Internet: URL: <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/wie-planetengetriebe-funktionieren-a-869546/>
(Abgerufen: 25.10.2021)
- [30] Platzer, R.: Konstruktion/ Entwicklung des EASy A3
Veröffentlicht: April 2020
- [31] News Directory: Bessel-Punkt.
Online im Internet: URL: <https://dir.md/wiki/Bessel-Punkt?host=de.wikipedia.org>
(Abgerufen: 27.10.2021)
- [32] Klein, B.: FEM Grundlagen und Anwendung der Finiten-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau, 10.Auflage, Springer, 2015
- [33] CADFEM GmbH, esocaet: Modalanalyse.
Online im Internet: URL: <http://www.cae-wiki.info/wikiplus/index.php/Modalanalyse#Grundlagen>
Stand: [2021/02/03]

- [34] ANSYS: Remote Displacement.
Online im Internet:
https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v202/en/wb_sim/ds_Remote_Displacement.html?q=remote%20displacement
(Abgerufen: 08.11.2021)
- [35] Ingenieurbüro Andreas Hanke: Singularitäten in der FEM
Online im Internet: <https://www.ing-hanke.de/know-how/singularitaeten-in-der-fem-ursachen-und-bewertung/>
(Abgerufen: 08.11.2021)

Anhang

A-1 FEM-Analyse

A-1.1 Netzstudie

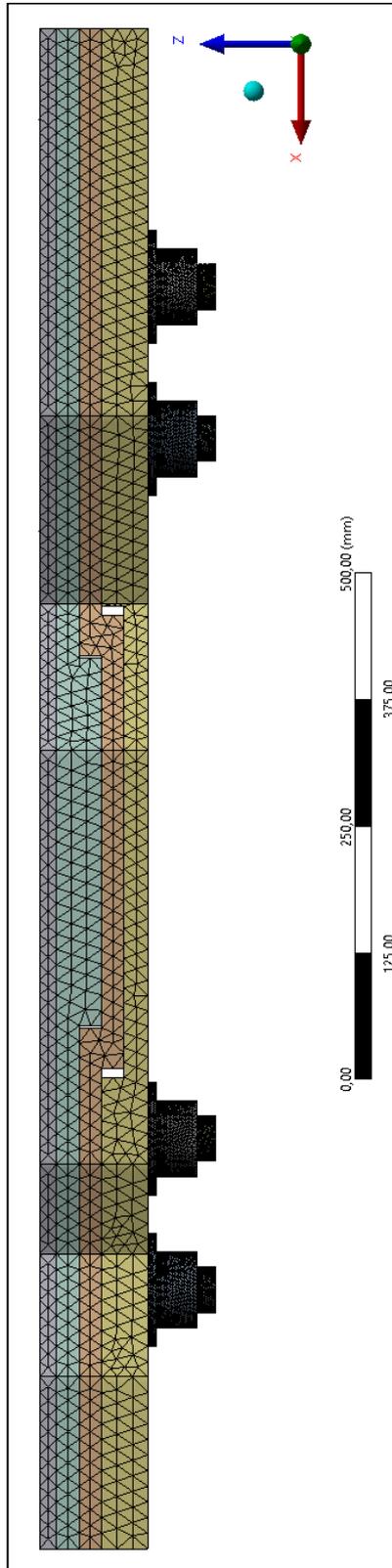


Abbildung A 1: Vernetzung mit einer Elementgröße von 15 mm

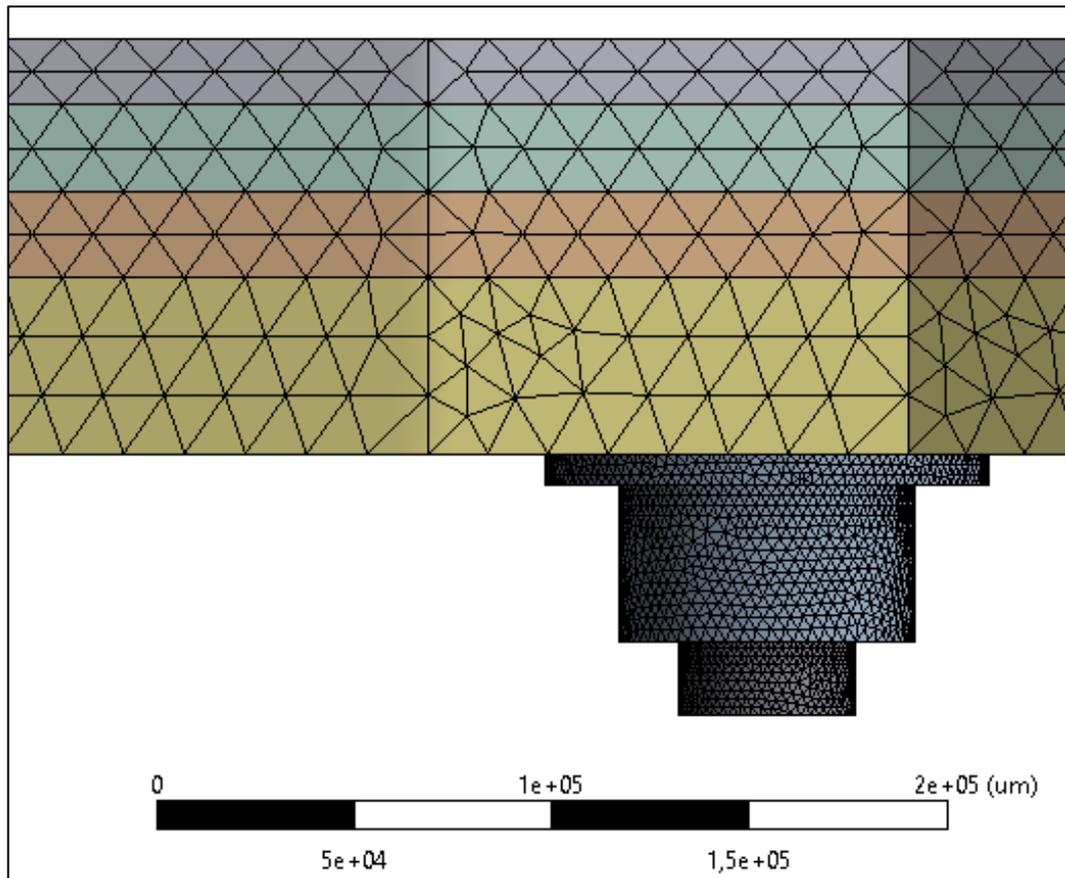


Abbildung A 2: Vergrößerte Ansicht der Vernetzung mit einer Elementgröße von 15 mm

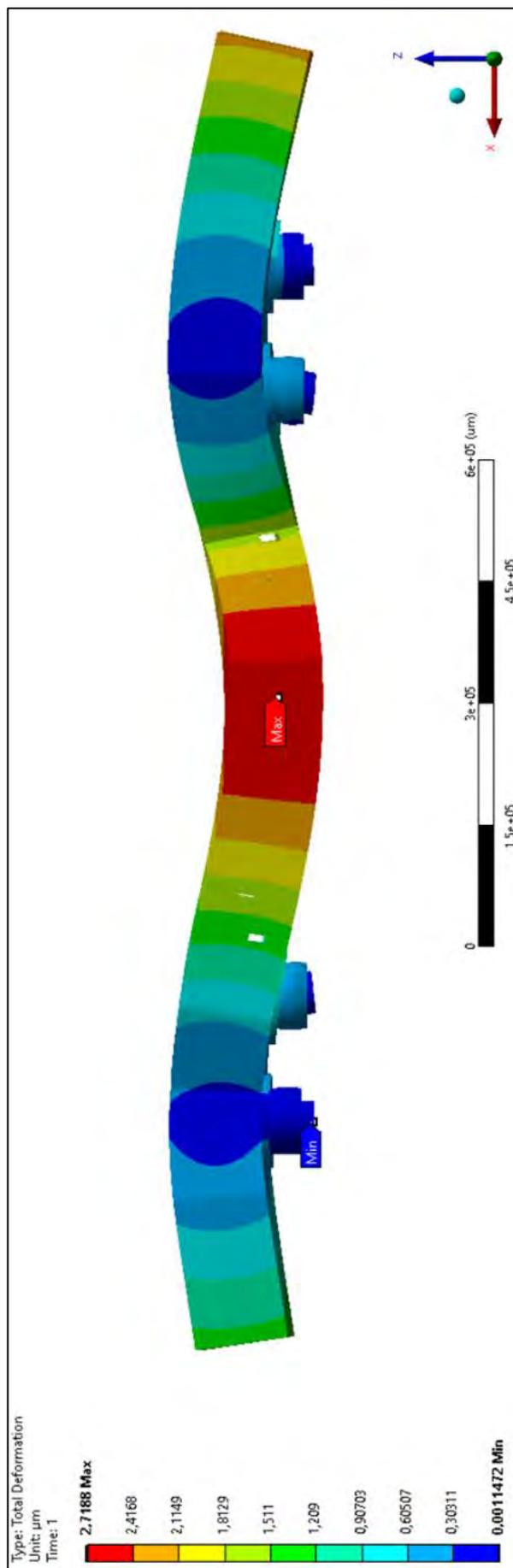


Abbildung A 3: Verformung bei einer Vernetzung mit einer Elementgröße von 15 mm

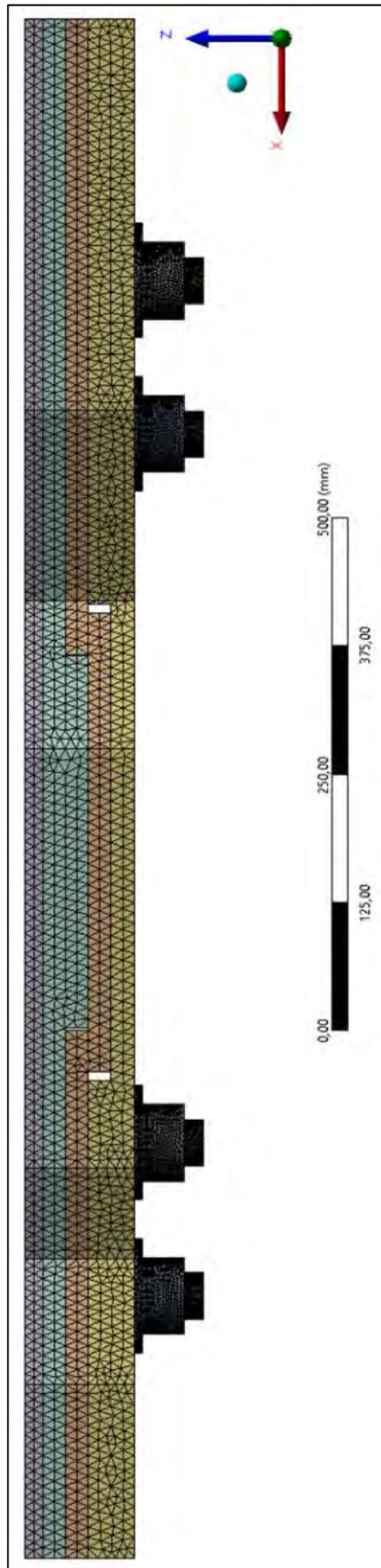


Abbildung A 4: Vernetzung bei einer Elementgröße von 10 mm

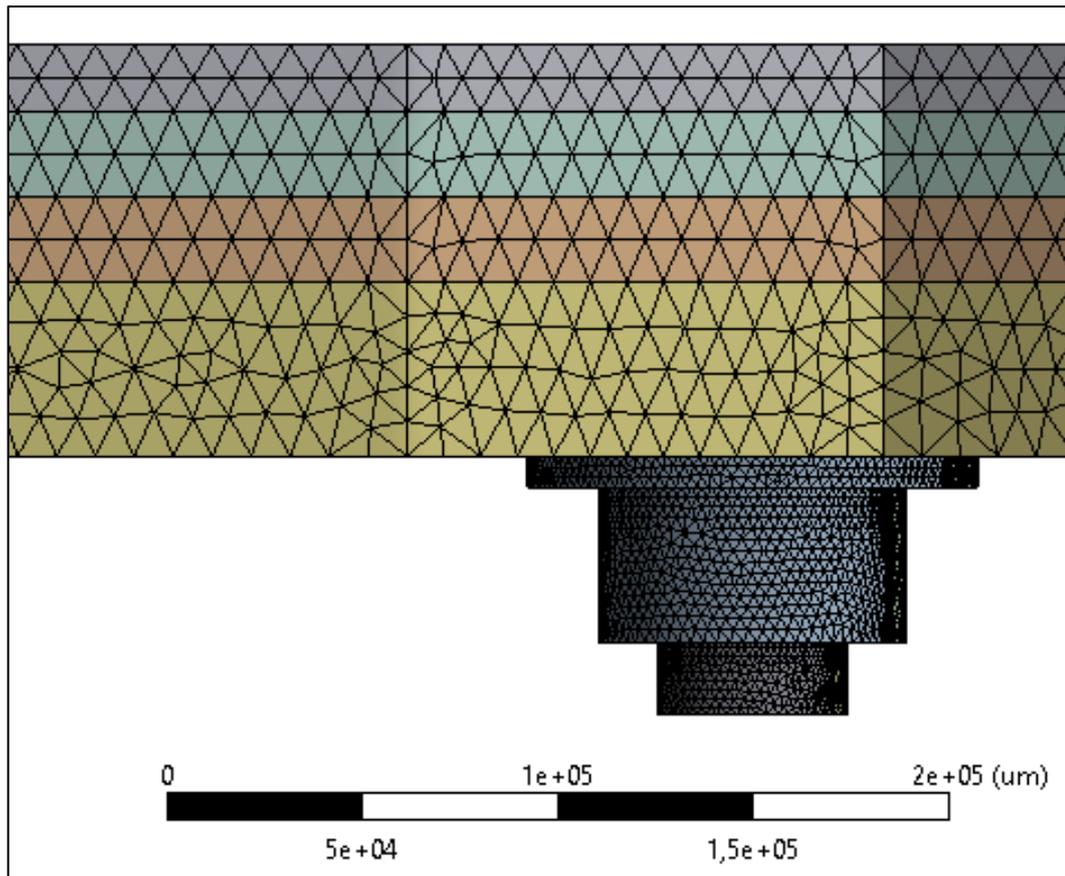


Abbildung A 5: Vergrößerte Ansicht der Vernetzung mit einer Elementgröße von 10 mm

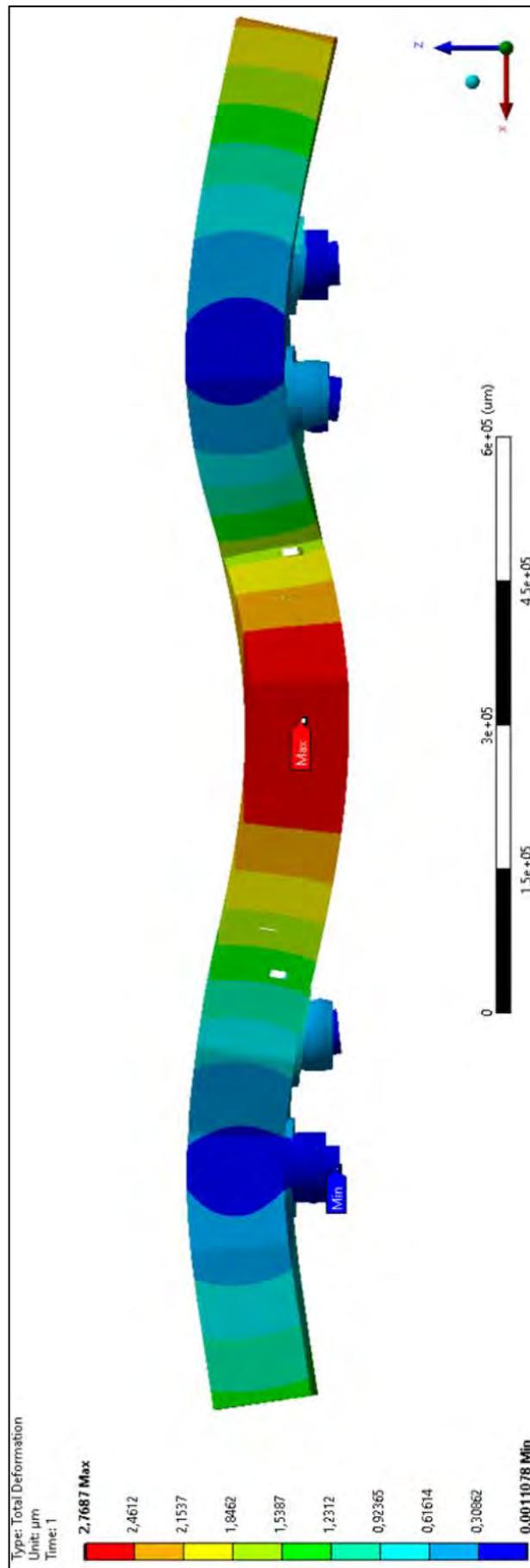


Abbildung A 6: Verformung bei einer Vernetzung mit einer Elementgröße von 10 mm

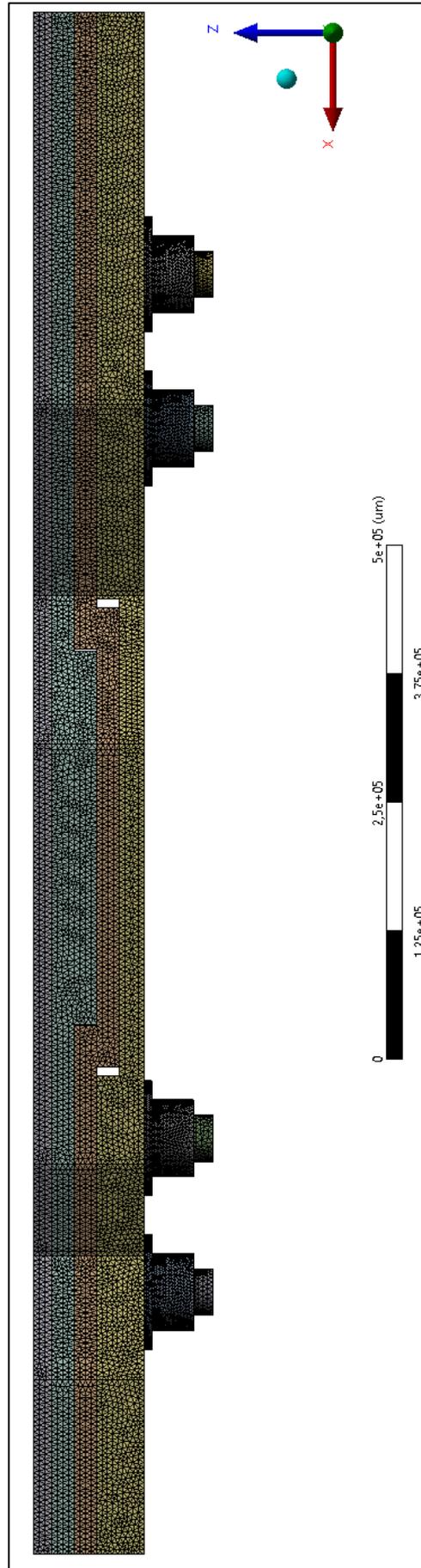


Abbildung A 7: Vernetzung bei einer Elementgröße von 5 mm

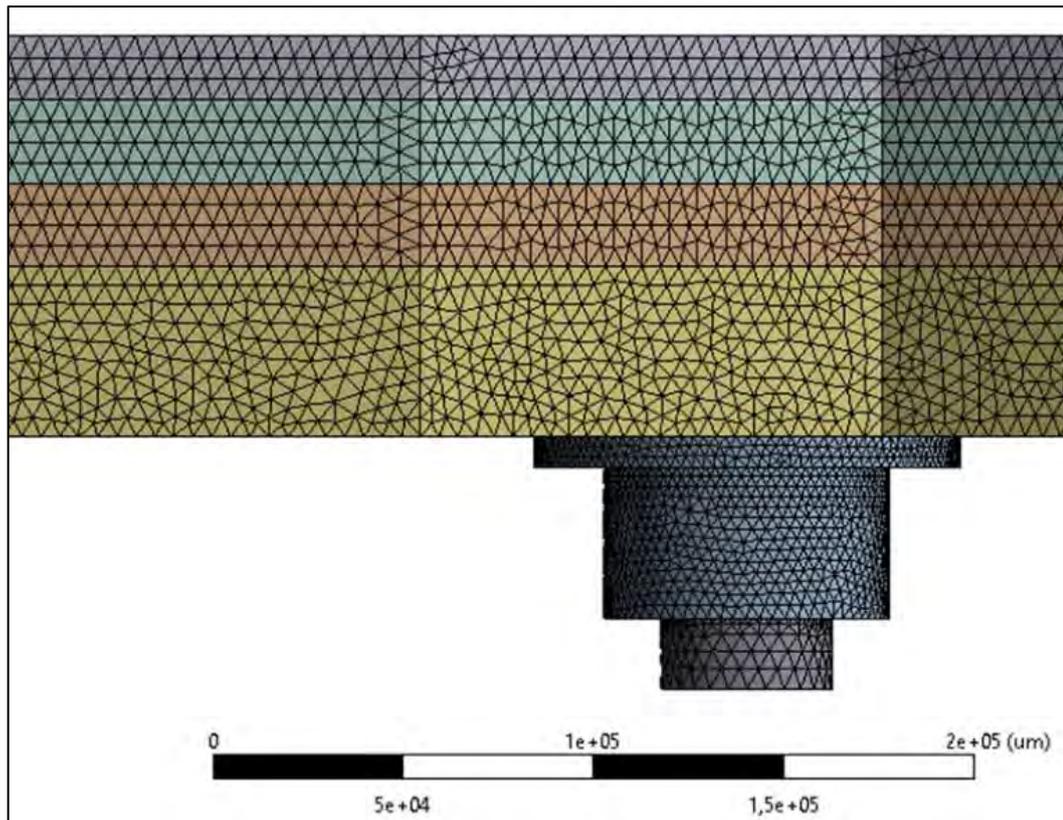


Abbildung A 8: Vergrößerte Ansicht der Vernetzung mit einer Elementgröße von 5 mm



Abbildung A 9: Verformung bei einer Vernetzung mit einer Elementgröße von 5 mm

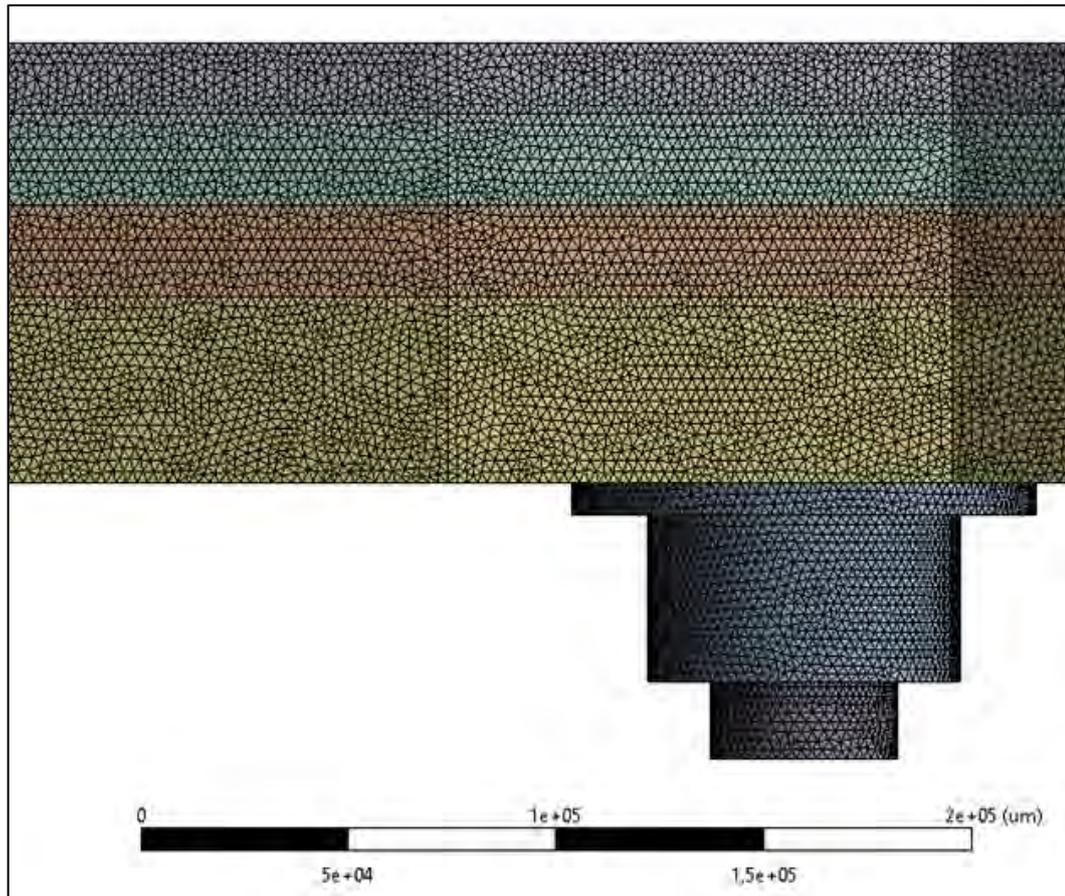


Abbildung A 10: Vergrößerte Ansicht der Vernetzung mit einer Elementgröße von 2,5 mm

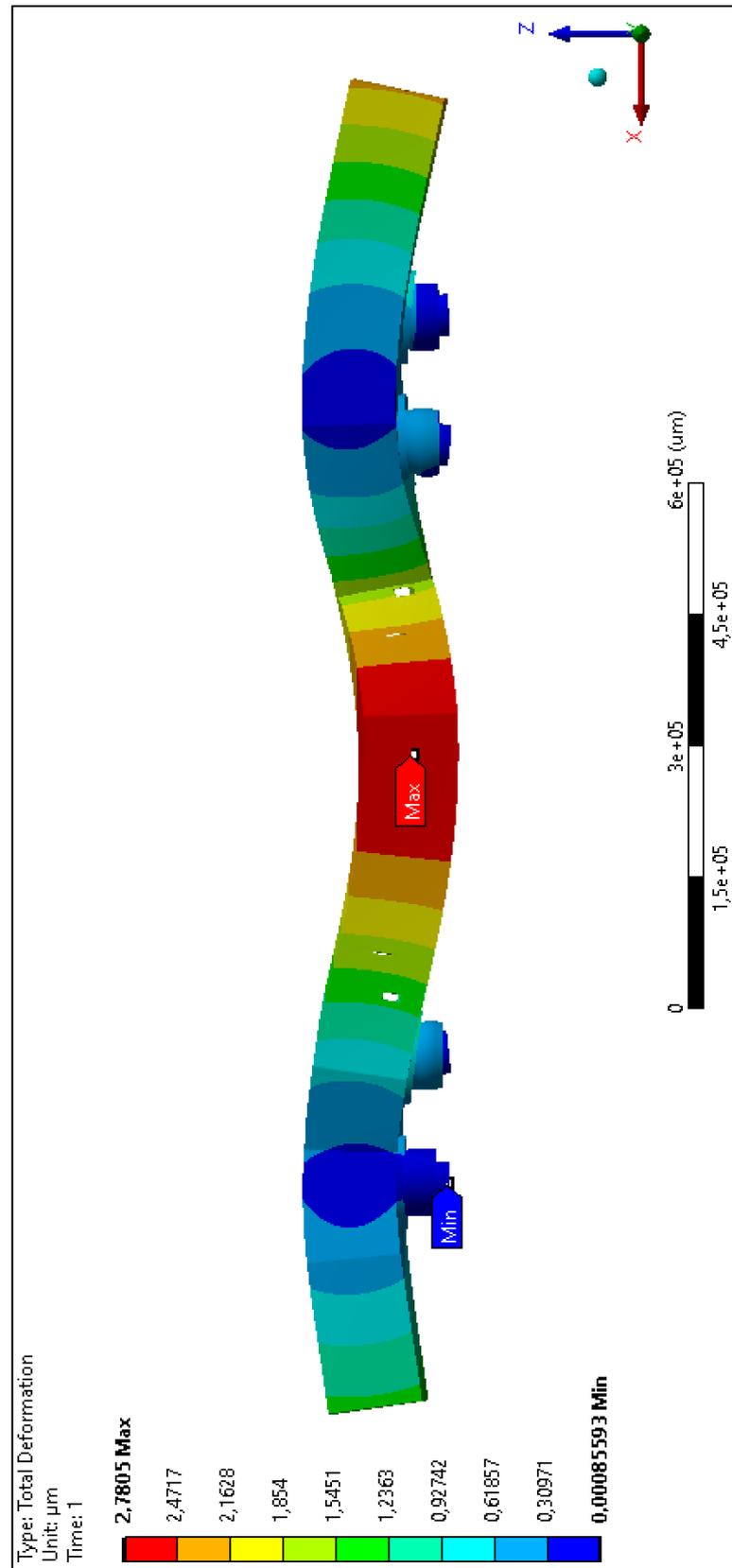


Abbildung A 11: Verformung bei einer Vernetzung mit einer Elementgröße von 2,5 mm

A-1.2 Modalanalyse

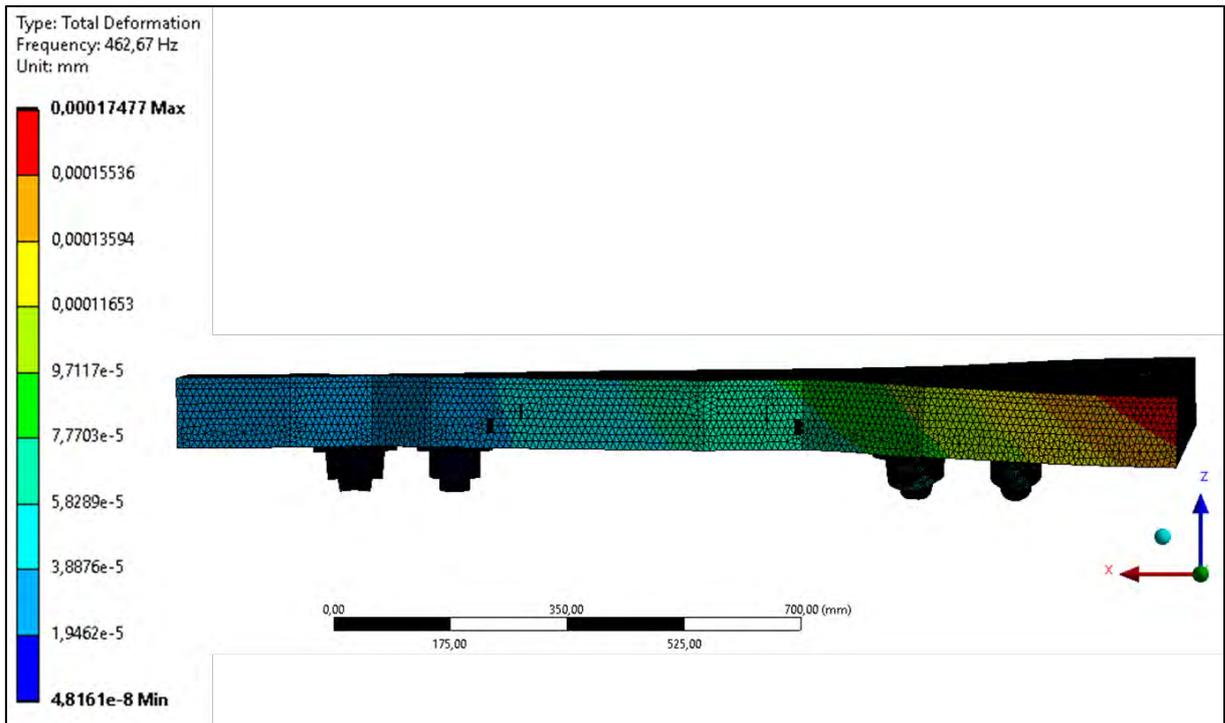


Abbildung A 12: Vorderansicht der Eigenform der zweiten Eigenfrequenz – ohne Magnetstruktur

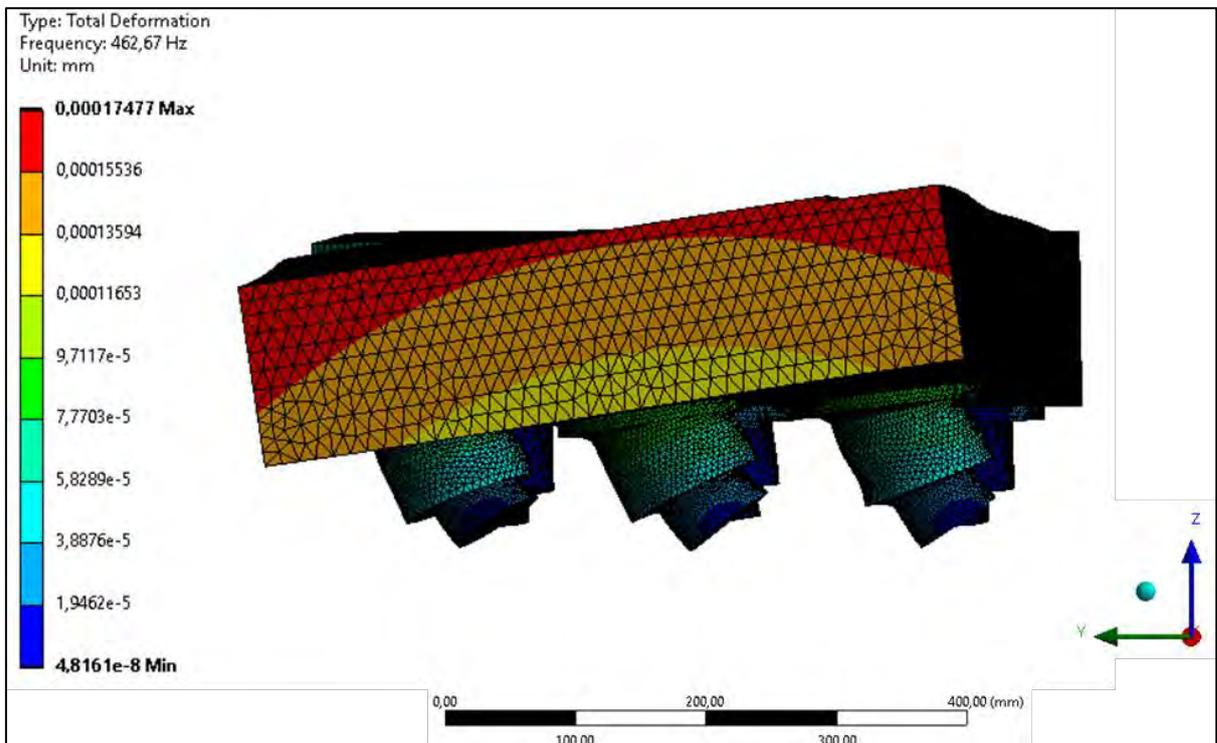


Abbildung A 13: Seitenansicht der Eigenform der zweiten Eigenfrequenz - ohne Magnetstruktur

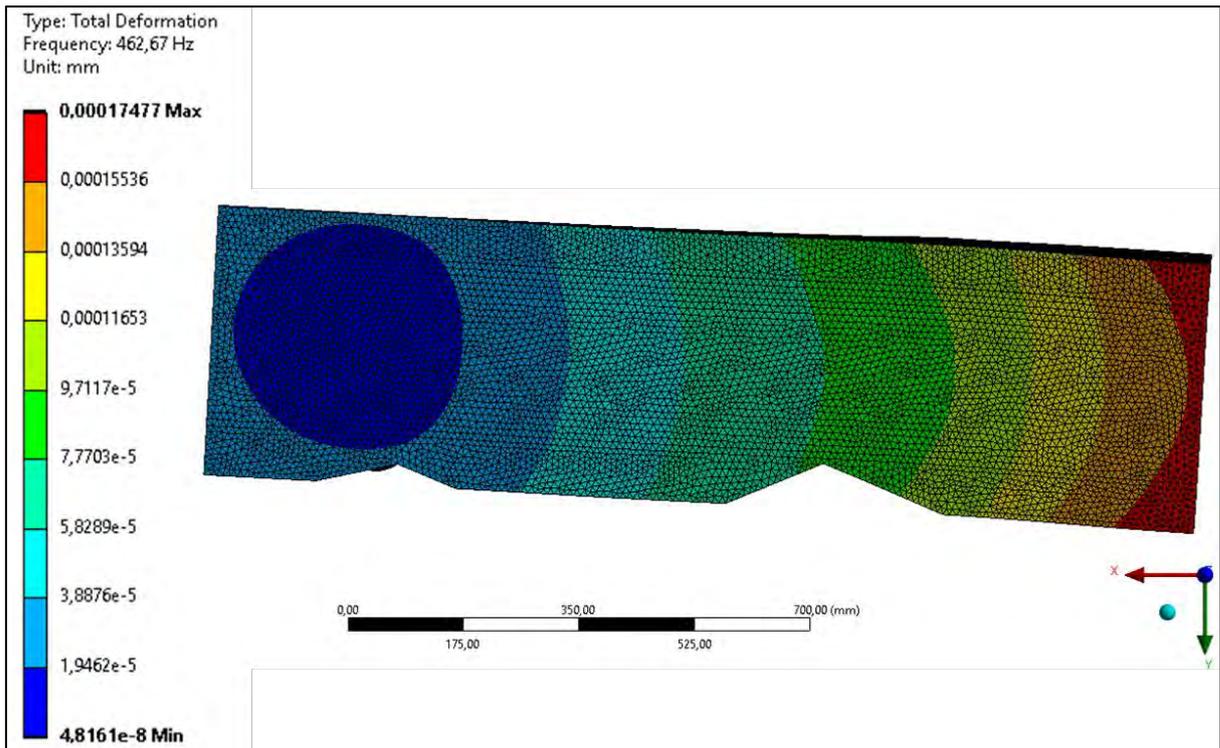


Abbildung A 14: Draufsicht der Eigenform der zweiten Eigenfrequenz - ohne Magnetstruktur

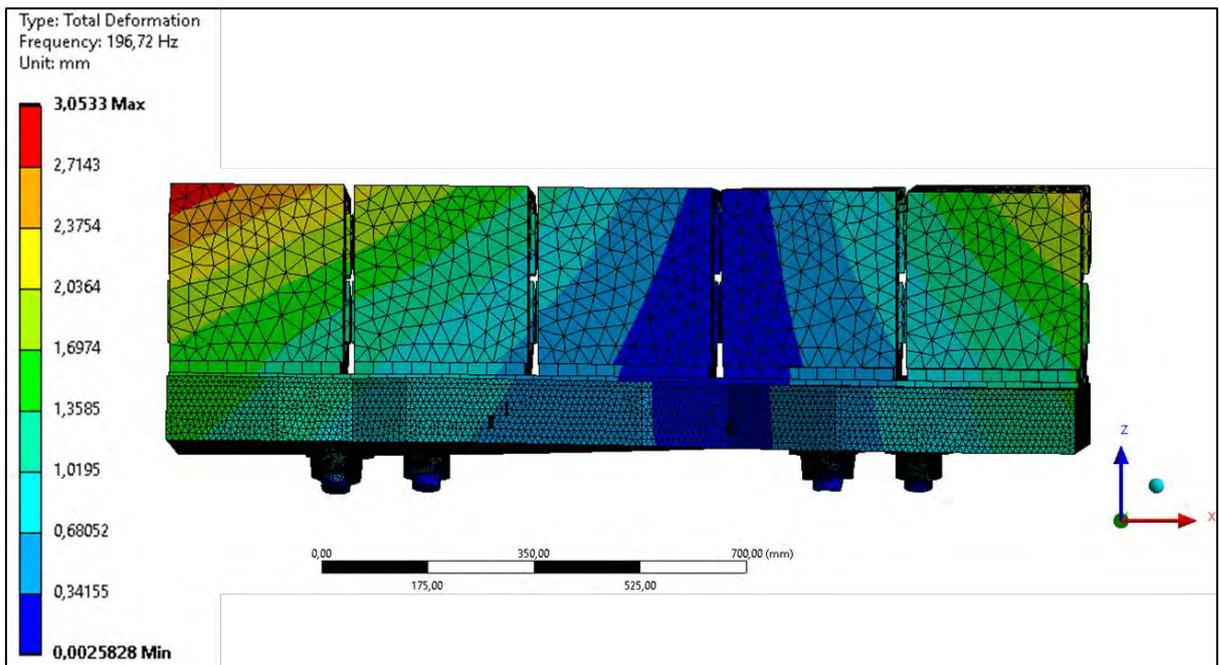


Abbildung A 15: Vorderansicht der Eigenform der zweiten Eigenfrequenz – mit Magnetstruktur

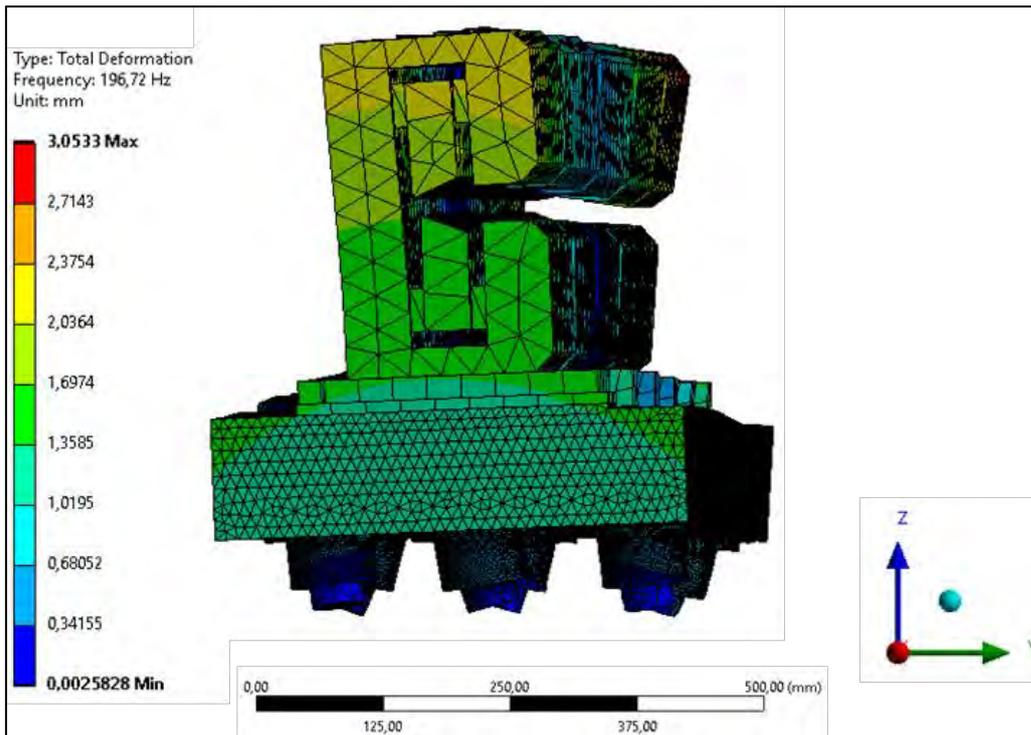


Abbildung A 16: Vorderansicht der Eigenform der zweiten Eigenfrequenz – mit Magnetstruktur

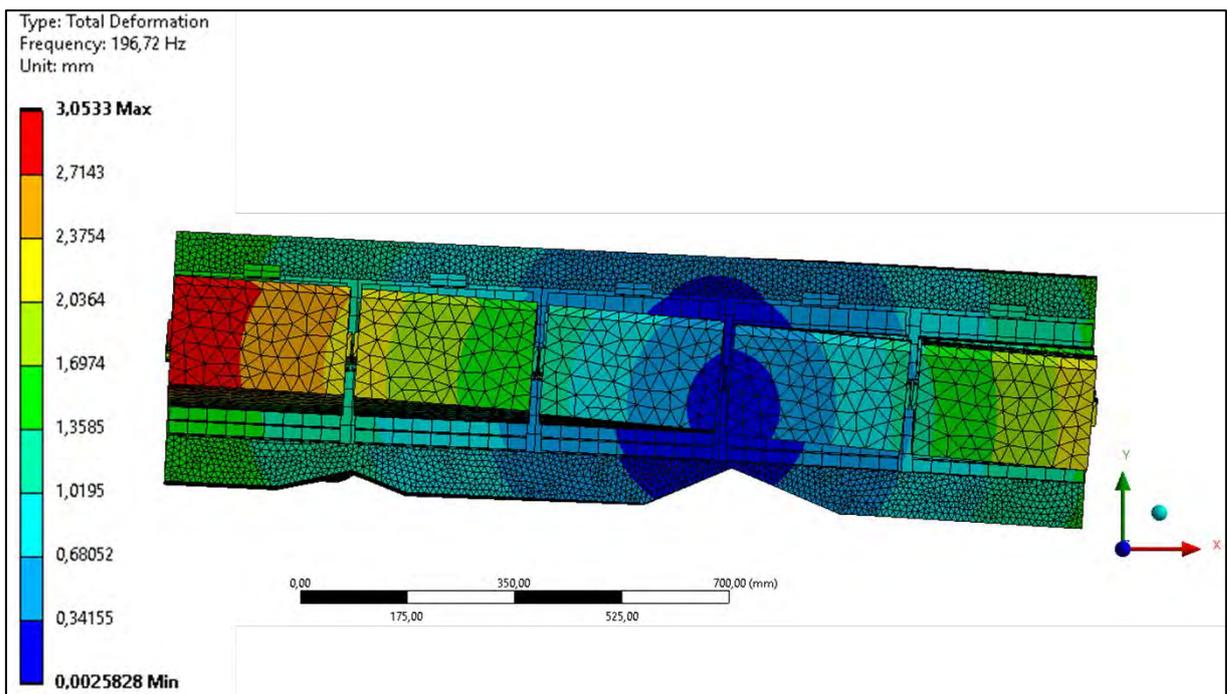


Abbildung A 17: Vorderansicht der Eigenform der zweiten Eigenfrequenz – mit Magnetstruktur

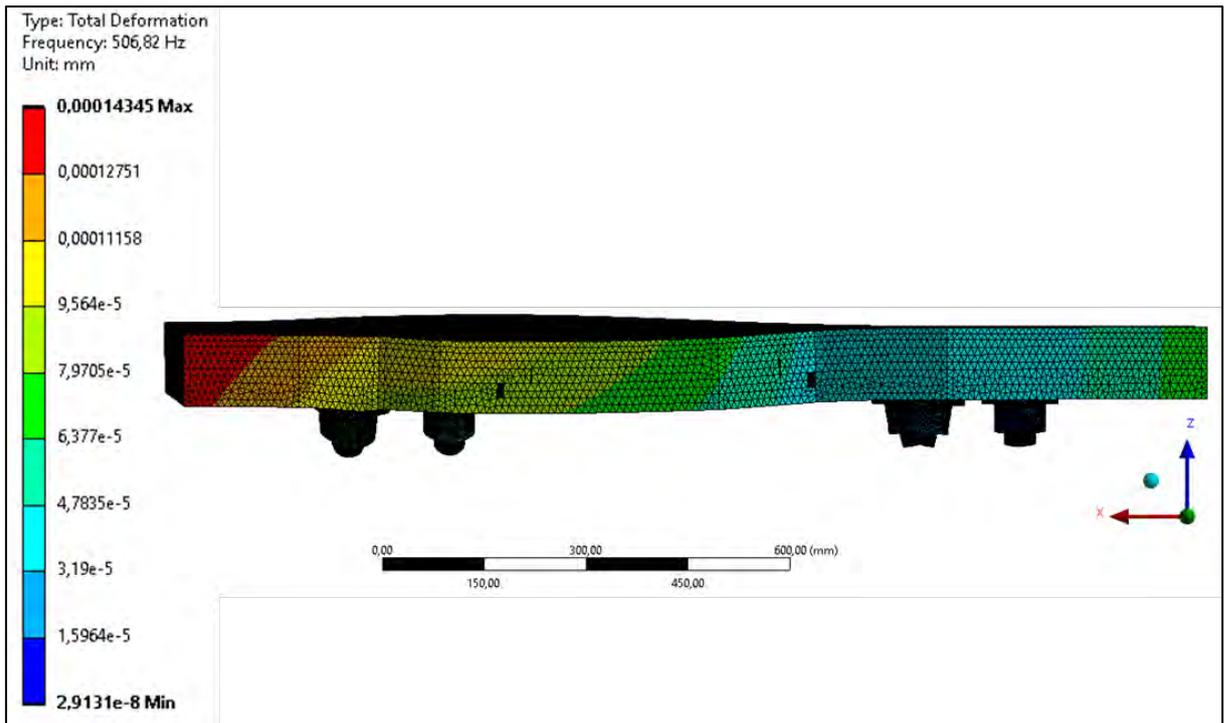


Abbildung A 18: Vorderansicht der Eigenform der dritten Eigenfrequenz - ohne Magnetstruktur

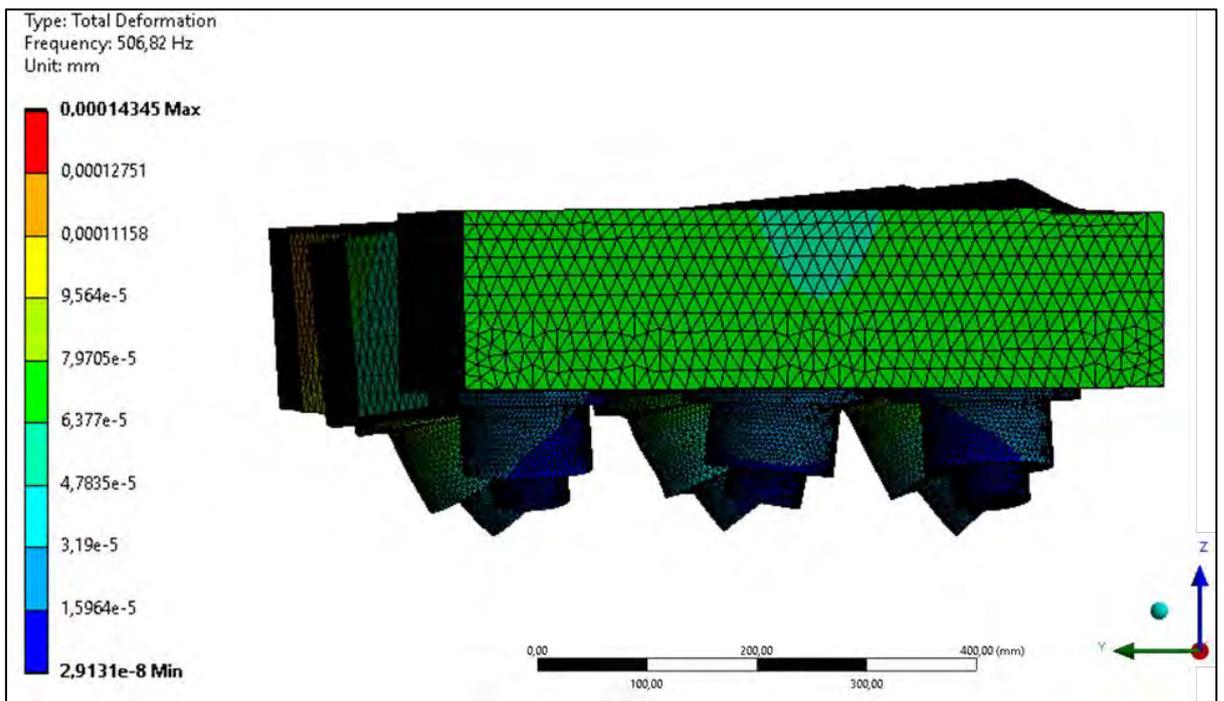


Abbildung A 19: Seitenansicht der Eigenform der dritten Eigenfrequenz - ohne Magnetstruktur

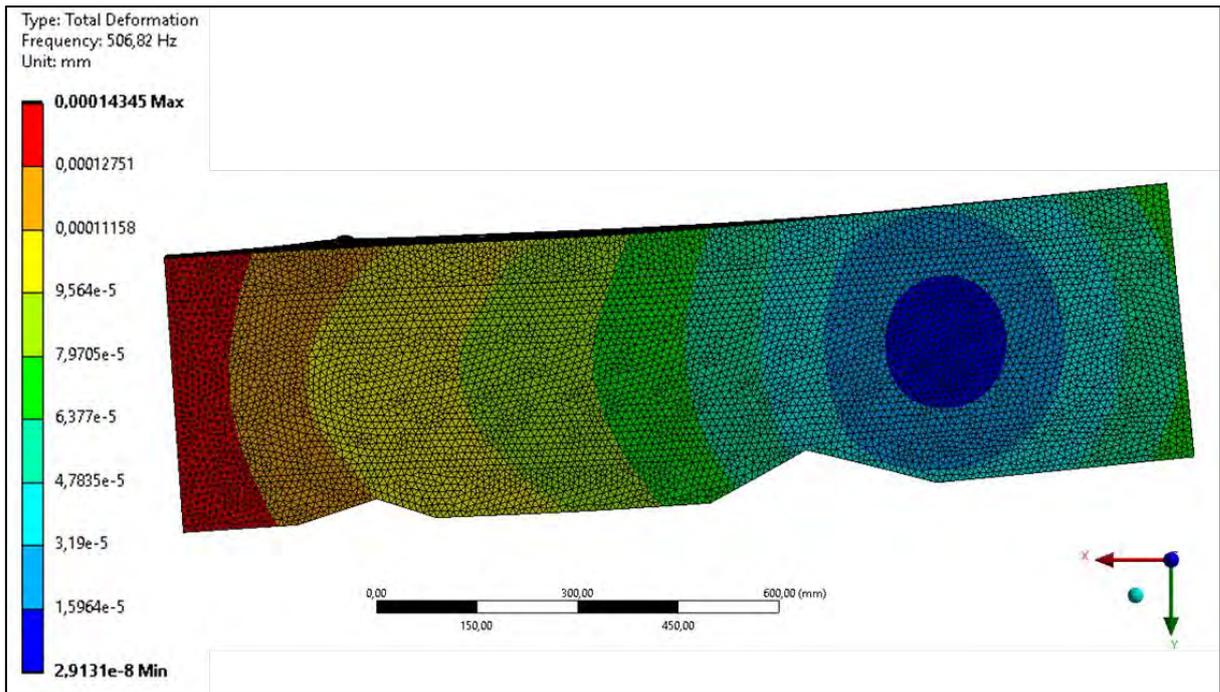


Abbildung A 20: Draufsicht der Eigenform der dritten Eigenfrequenz - ohne Magnetstruktur

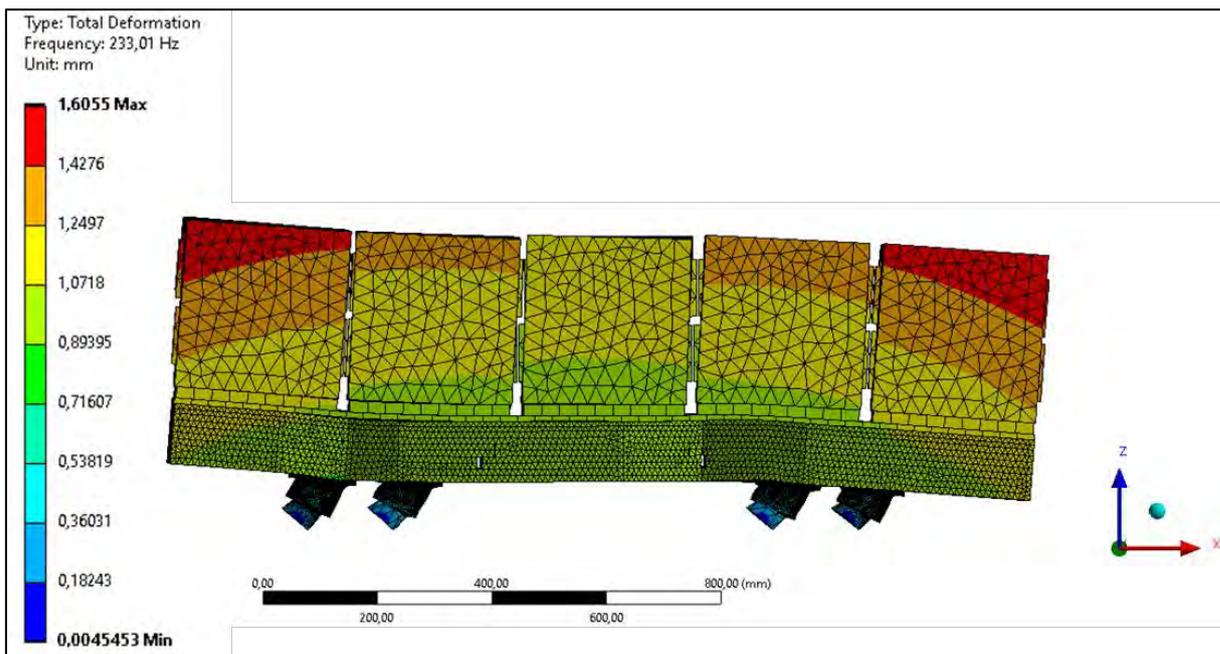


Abbildung A 21: Vorderansicht der Eigenform der dritten Eigenfrequenz – mit Magnetstruktur

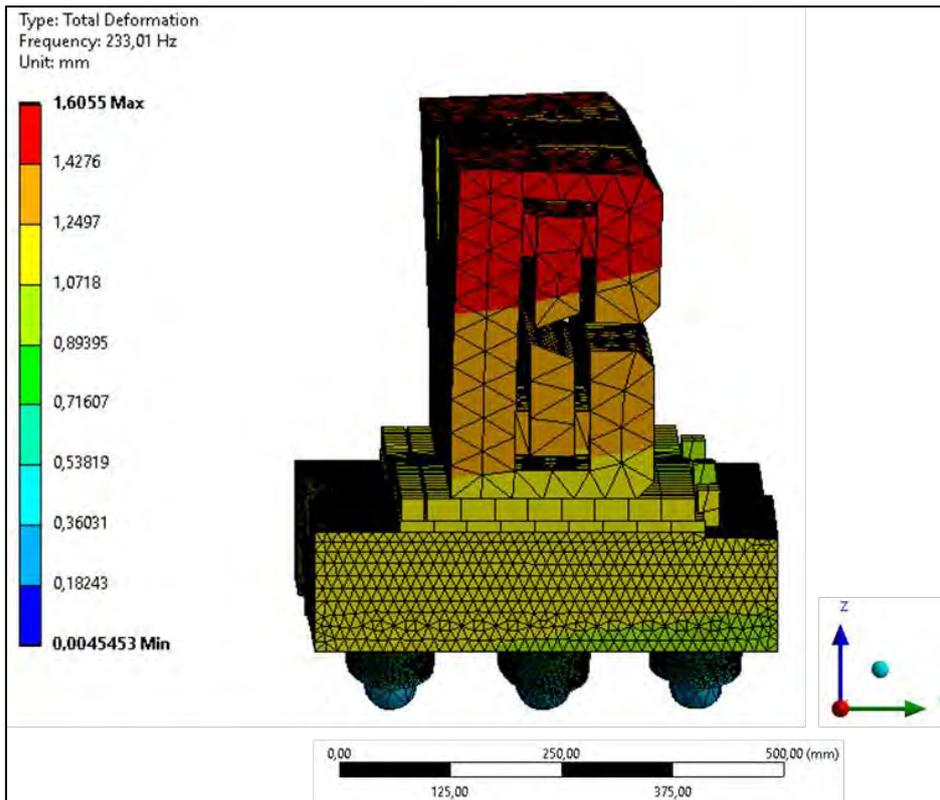


Abbildung A 22: Seitenansicht der Eigenform der dritten Eigenfrequenz – mit Magnetstruktur

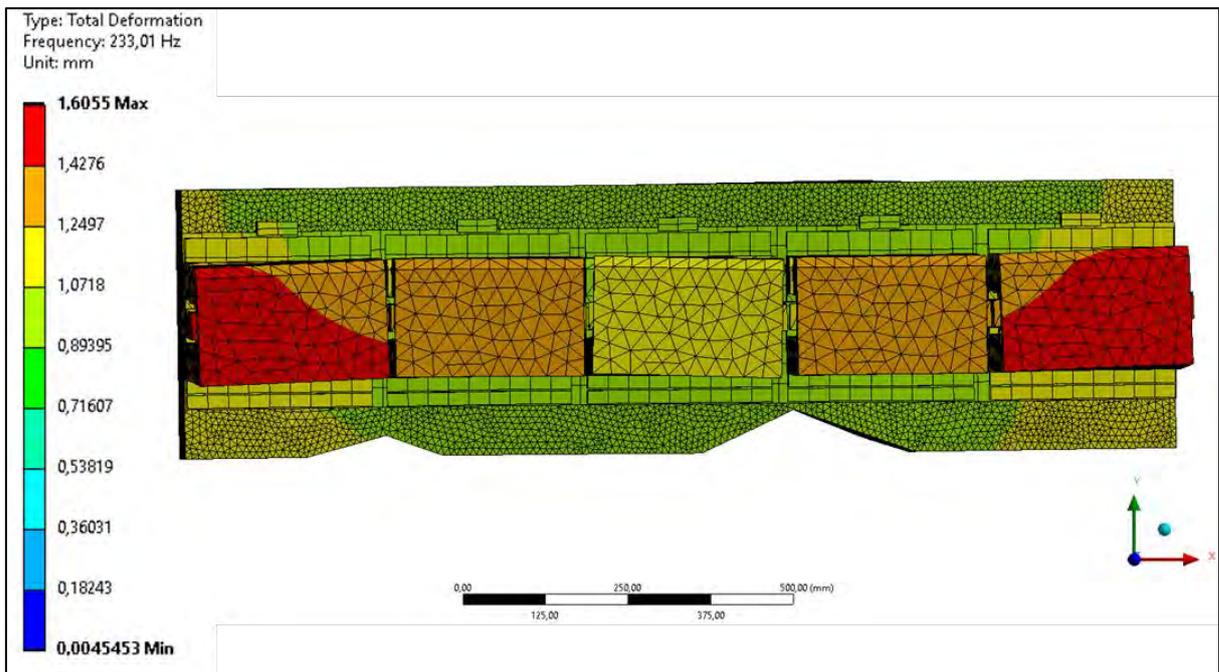


Abbildung A 23: Draufsicht der Eigenform der dritten Eigenfrequenz – mit Magnetstruktur

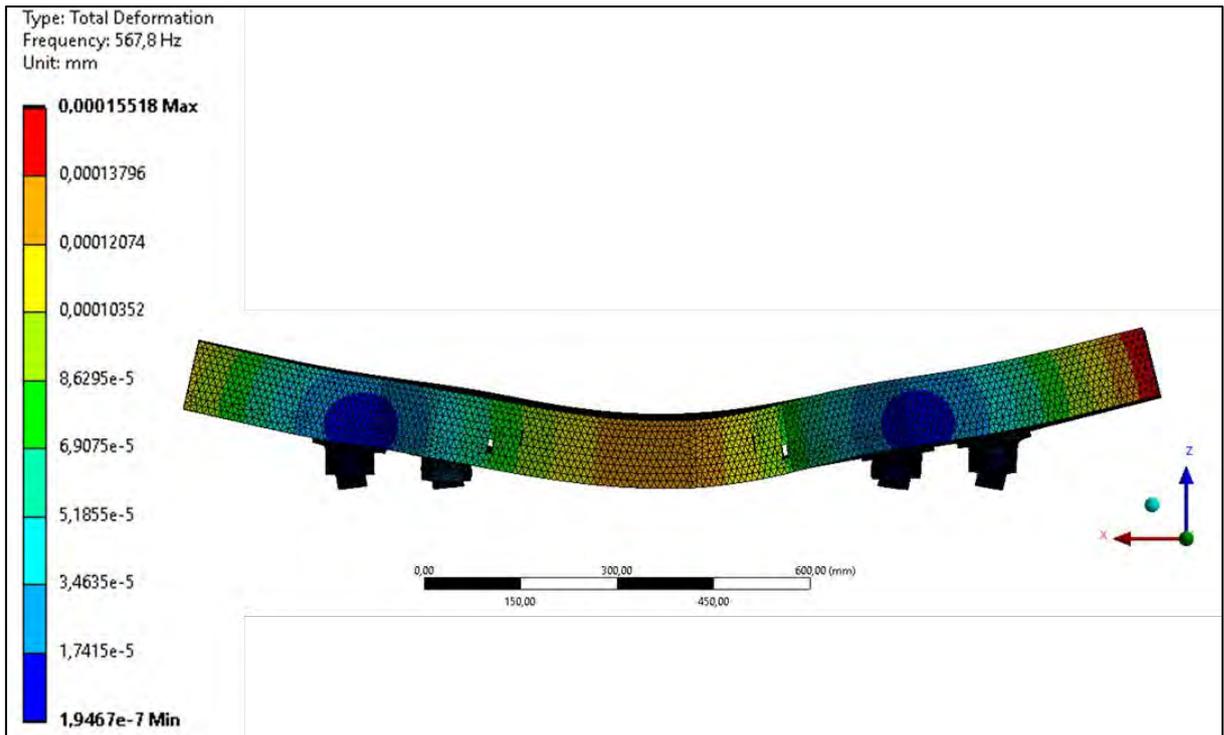


Abbildung A 24: Vorderansicht der Eigenform der vierten Eigenfrequenz - ohne Magnetstruktur

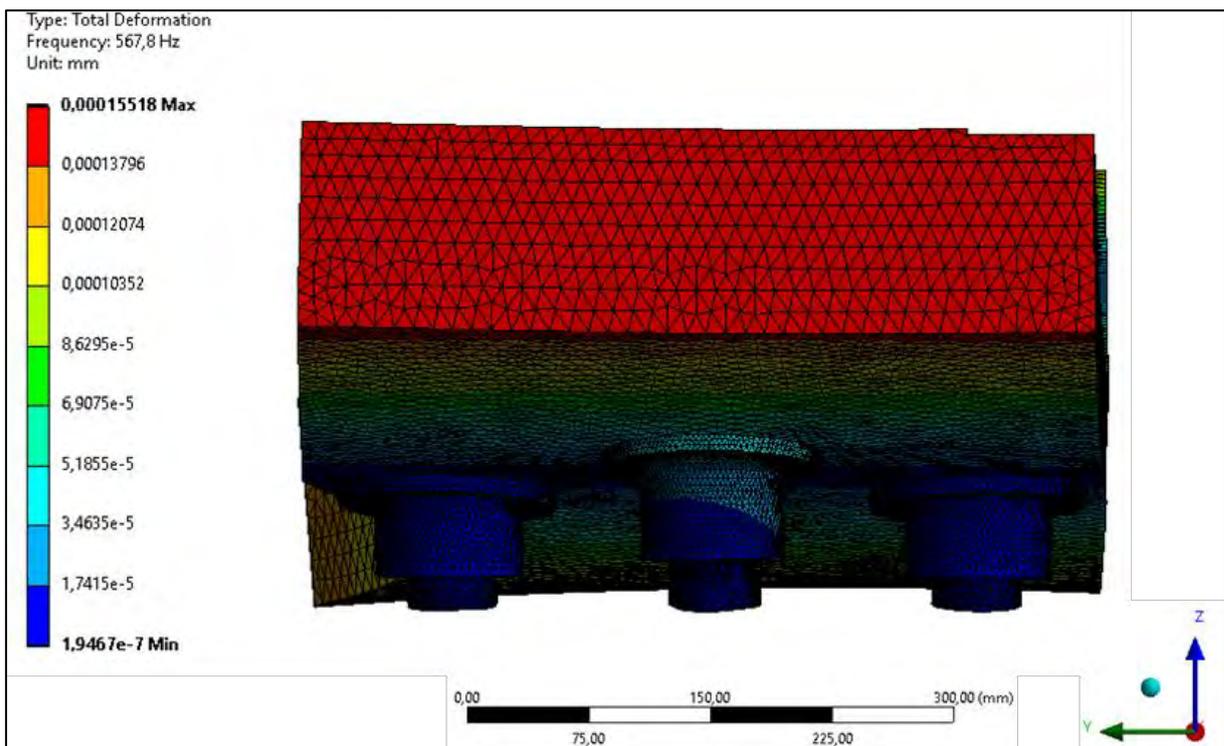


Abbildung A 25: Seitenansicht der Eigenform der vierten Eigenfrequenz - ohne Magnetstruktur

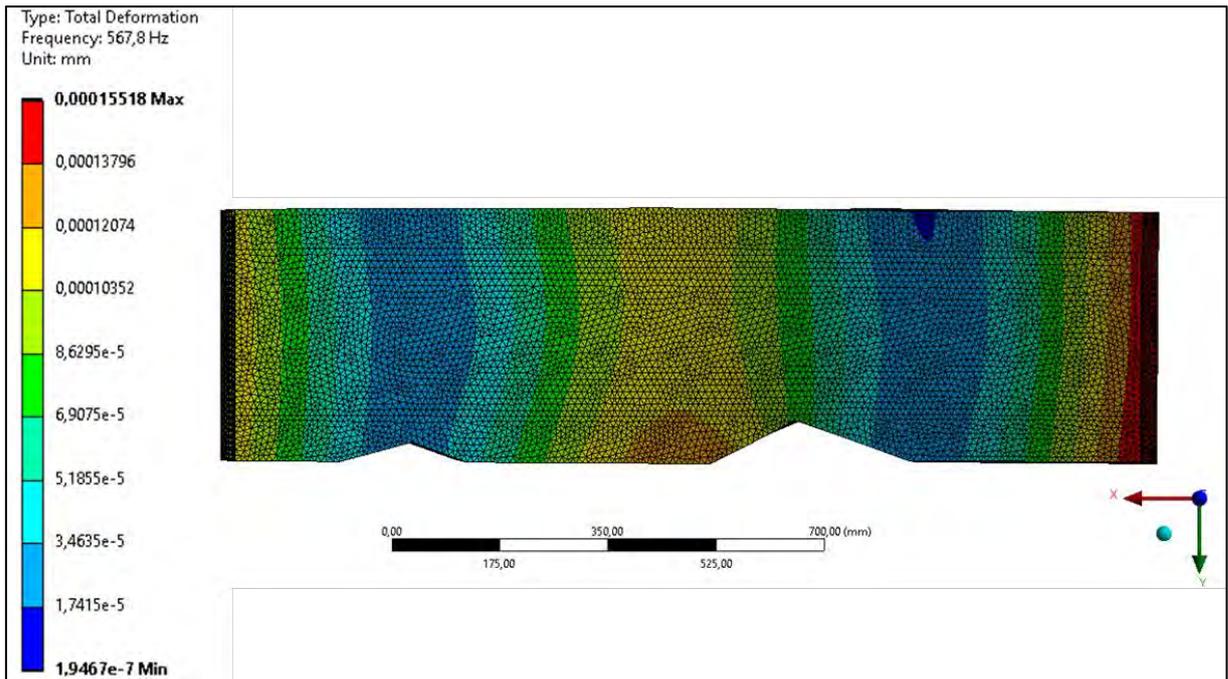


Abbildung A 26: Draufsicht der Eigenform der vierten Eigenfrequenz - ohne Magnetstruktur

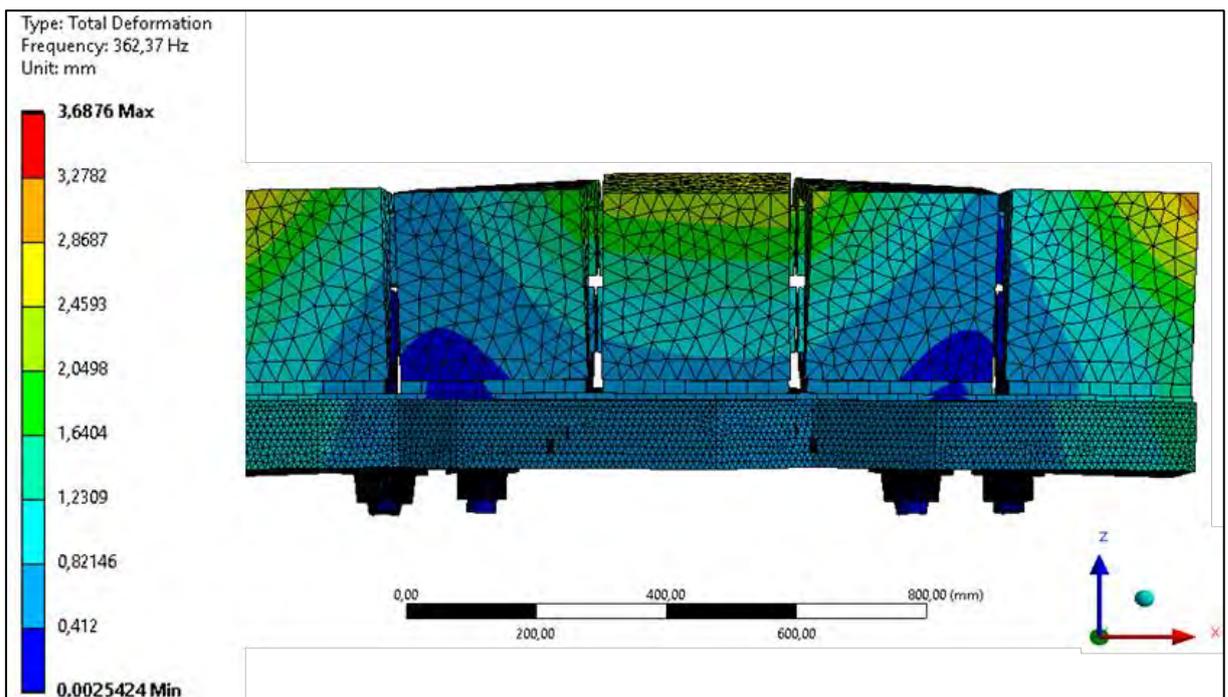


Abbildung A 27: Vorderansicht der Eigenform der vierten Eigenfrequenz – mit Magnetstruktur

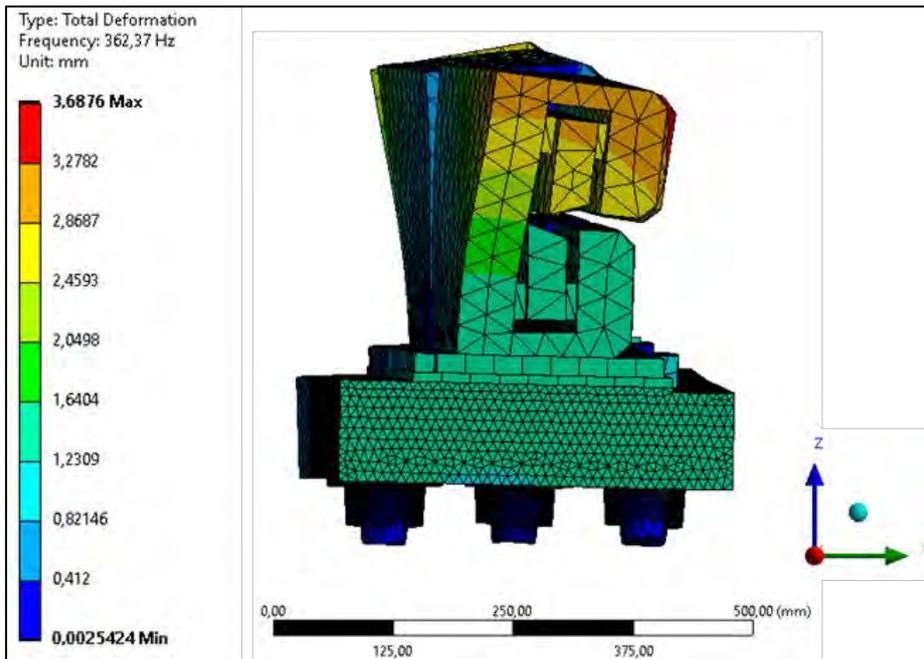


Abbildung A 28: Seitenansicht der Eigenform der vierten Eigenfrequenz – mit Magnetstruktur

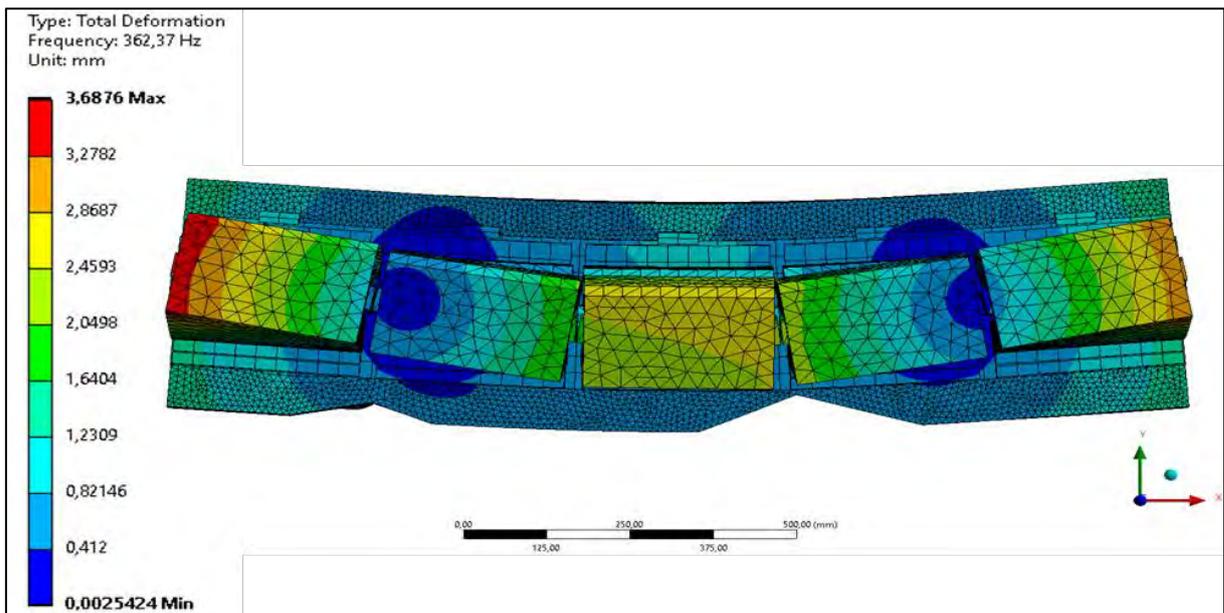


Abbildung A 29: Draufsicht der Eigenform der vierten Eigenfrequenz – mit Magnetstruktur



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

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

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Zilch

Vorname: Melanie

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

Konzeptentwicklung und Konstruktion einer Girderjustiereinheit für DL-Ablenkmagnete

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

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

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

19.11.2021

Datum

