

Statische Analyse der mechanischen Belastungsgrenze von Sperrelementen eines Zugangssystems mit Ansys¹

Felix Berger

Abstract— Im Rahmen dieser Arbeit soll eine statische Festigkeitsanalyse vier verschiedener BÜGELvarianten für eine Durchgangsschleuse mit dem FEM Programm Ansys durchgeführt werden

I. EINLEITUNG

Um das Durchschreiten einer Durchgangsschleuse zu erleichtern wurde eine neuartige Durchgangsschleuse entwickelt, welche durch Verschieben eines horizontalen BÜGELS zwei Zugangsbereiche voneinander trennt (Abbildung 1).

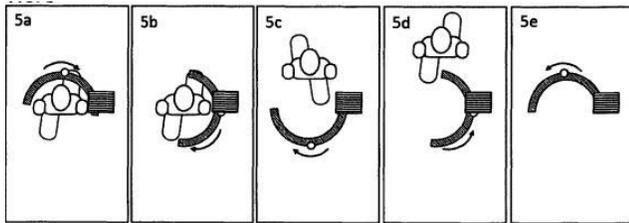


Abbildung 1: Funktion Durchgangsschleuse [1] S. 10

Die Forschungsarbeit beschäftigt sich dabei mit der Auslegung des BÜGELS der Durchgangsschleuse, wobei verschiedene Ausführungen erstellt wurden, welche im Rahmen dieser Arbeit durch ein FEM Programm statisch untersucht werden sollen. Dabei handelt es sich um vier verschiedene Ausführungen von BÜGELN mit der Form eines Kreisringsausschnitts mit verschiedenen Öffnungswinkeln und Innendurchmessern. Ein BÜGEL besteht aus einem Rechteckrohr aus Aluminium mit einer Wandstärke von 3 mm, welches an den beiden kurzen Seiten komplett verrundet ist (vgl. Abbildung 2). Ein weiterer besteht aus einem rechteckigen Werkstoffverbund, welcher an den kurzen Außenkanten aus Stahlblechen besteht, die über den Kunststoff PMMA miteinander verbunden sind. Die letzten beiden BÜGEL (vgl. Abbildung 3) sind ähnlich wie der zweite BÜGEL aufgebaut, jedoch haben diese zusätzlich an der Innenseite eine durchgängige Nut und das Blech an den Außenseiten besteht bei diesen Varianten aus Aluminium, die beiden Varianten unterscheiden sich lediglich in der Höhe des PMMA zwischen den beiden Blechen.

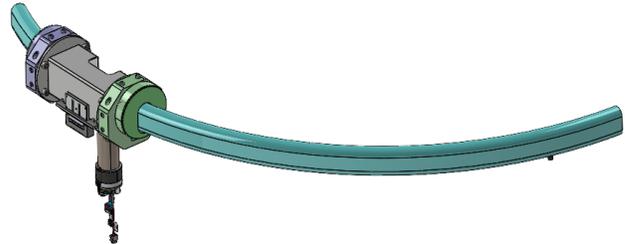


Abbildung 2: BÜGEL mit Lagerung Variante 1

Die BÜGEL werden dabei auf verschiedenen Varianten von Rollen gelagert, welche sich in ihrem Material unterscheiden, einmal reine Kunststoffrollen, einmal reine Stahlrollen und einmal Kunststoffrollen mit Stahlkern, sowie in der Höhe, welche sich der unterschiedlichen BÜGELgesamthöhe der verschiedenen BÜGELvarianten anpasst. Die Anordnung dieser Rollen ist jedoch über die BÜGELvarianten hinweg gleichbleibend.

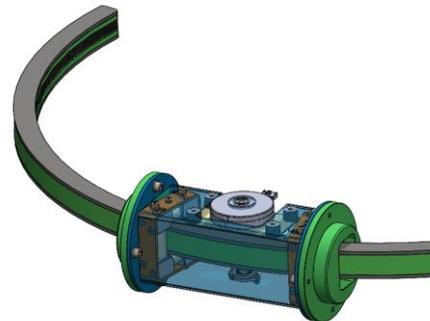


Abbildung 3: BÜGEL Variante 3 & 4

Die Belastung auf den BÜGEL soll dabei einen Menschen mit 100 kg entsprechen, der sich mit seinem kompletten Körpergewicht auf dem BÜGEL abstützt. Diese Belastung wird über eine Kraft von 1000 N an der am weitesten entfernten Außenfläche des BÜGELS bezogen auf die Auflagerung simuliert.

¹ Diese Forschungsarbeit wurde in einem Industrieunternehmen für Antriebstechnik durchgeführt.

II. VORGEHEN UND METHODIK

A. Model Vorbereitung

Um die Berechnungszeit der einzelnen Bauteile zu reduzieren müssen die Modelle vereinfacht werden. Hierfür werden alle Bauteile, die nicht direkt in Kontakt mit dem eigentlichen BÜGEL stehen, aus dem CAD-Modell entfernt, wodurch nur die Lagerung und der BÜGEL selbst übrigbleiben. Die Antriebsrolle des BÜGELS kann in dem Fall ebenfalls entfernt werden, da diese trotz direktem Kontakt mit dem BÜGEL durch die spezielle Gestaltung der Lagerung des Motors lediglich das Antriebsmoment und aller höchstens kleine Kräfte die Durch die verformen des BÜGELS entstehen, übertragen kann.

Um die Berechnungszeit weiter zu reduzieren, werden die Radien, welche lediglich dazu dienen das Verletzungsrisiko durch scharfe Kanten zu minimieren, auf Grund des minimalen Einflusses auf die Spannungen im BÜGEL, entfernt. Aus diesen Vereinfachungen resultieren die einzelnen Modelle, die in den Abbildung 4- 6 schematisch dargestellt sind.

Zusätzlich wird der BÜGEL in unterschiedliche Bereiche aufgeteilt, der Grund hierfür ist ebenfalls die Reduzierung der Berechnungszeit. Hierfür wird der Körper an den Auflagerstellen aufgespalten, da hier die höchste Belastung in den Bauteilen erwartet wird. Dadurch ist es möglich in diesen Bereich die Vernetzung zu verfeinern, um die Genauigkeit der Berechnung in den relevanten Bereichen zu erhöhen. Diese Trennung ist dabei eine rein optische, da dem Programm zusätzlich mitgeteilt wird, den getrennten BÜGEL weiterhin als ein Bauteil anzusehen, wodurch die Kraftleitung in dem Bauteil genau gleich ist, als wenn dieses nicht aufgespalten worden wäre.

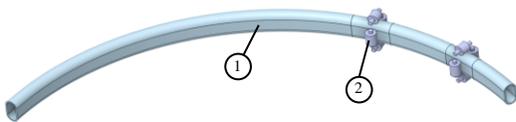


Abbildung 4: Bügel Variante 1

1. Bügel aus AlMg3, Innendurchmesser 635 mm, Breite 30 mm, Höhe 60 mm mit einer Wandstärke von 3 mm
2. Führungsrollen einmal aus POM mit einer Achse aus X17CrNi16-2 und einmal mit der Rolle und der Achse aus X17CrNi16-2



Abbildung 5: Bügel Variante 2

1. Bügelbleche mit Innendurchmesser 635 mm, mit der Breite 30 mm und der Dicke 5 mm aus X17CrNi16-2
2. Mittelring aus PMMA, Breite und Durchmesser siehe Pos. 1, Höhe 40 mm
3. Führungsrollen einmal aus POM mit einer Achse aus X17CrNi16-2 und einmal mit der Rolle und der Achse aus X17CrNi16-2

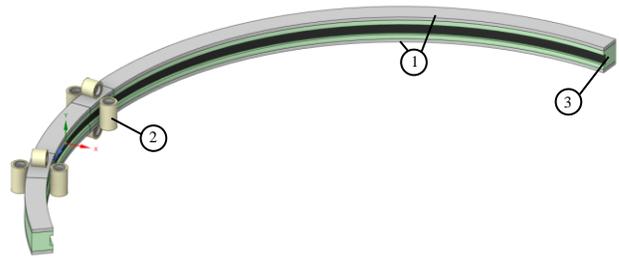


Abbildung 6: Bügel Variante 3&4

1. Bügelbleche mit Innendurchmesser 500 mm, mit der Breite 30 mm und der Dicke 5 mm aus AlMg4,5Mn
2. Führungsrolle mit einem Kern aus V2A der mit PUR ummantelt ist
3. Mittelring aus PMMA, Breite und Durchmesser siehe Pos. 1, Höhe bei Variante 3 sind 30 mm und 40 mm bei Variante 4

B. Materialkennwerte

Neben der Anpassung der Modelle müssen die einzelnen Werkstoffkennwerte dem Berechnungsprogramm übergeben werden. Hierbei werden folgende Werte verwendet:

- X17CrNi16-2 (EN 10088-3) [2]: $R_e = 750 \text{ N/mm}^2$; $R_m = 850 \text{ N/mm}^2$; E-Modul = 215000 N/mm^2 ; Bruchdehnung = 7 %; Dichte = $7,7 \text{ g/cm}^3$
- V2A (EN 10088-3 X5CrNi18-10) [3]: $R_e = 400 \text{ N/mm}^2$; $R_m = 600 \text{ N/mm}^2$; E-Modul = 210000 N/mm^2 ; Bruchdehnung = 25 %; Dichte = $7,9 \text{ g/cm}^3$
- AlMg3 (EN AW 5754-H18) [4]: $R_e = 240 \text{ N/mm}^2$; $R_m = 280 \text{ N/mm}^2$; E-Modul = 70000 N/mm^2 ; Bruchdehnung = 2 %; Dichte = $2,68 \text{ g/cm}^3$
- AlMg4,5Mn (EN AW 5083-H111) [5]: $R_e = 125 \text{ N/mm}^2$; $R_m = 275 \text{ N/mm}^2$; E-Modul = 71000 N/mm^2 ; Bruchdehnung = 15 %; Dichte = $2,66 \text{ g/cm}^3$
- PMMA [6]: $R_e = - \text{N/mm}^2$; $R_m = 73 \text{ N/mm}^2$; E-Modul = 3200 N/mm^2 ; Bruchdehnung = 3,5 %; Dichte = $1,19 \text{ g/cm}^3$
- POM-H [7]: $R_e = 72 \text{ N/mm}^2$; $R_m = 70 \text{ N/mm}^2$; E-Modul = 3100 N/mm^2 ; Bruchdehnung = 50 %; Dichte = $1,42 \text{ g/cm}^3$
- PUR [8]: $R_e = 37 \text{ N/mm}^2$; $R_m = 49 \text{ N/mm}^2$; E-Modul = 1250 N/mm^2 ; Bruchdehnung = 13 %; Dichte = $1,2 \text{ g/cm}^3$

C. Vernetzung

Um die Spannungen im Bauteil zu berechnen, muss dieses Vernetzt werden. Dabei gilt im Allgemeinen je feiner die Vernetzung desto genauer sind die Ergebnisse. Jedoch steigt damit auch die Berechnungszeit, weshalb die Vernetzung lediglich in den Bereichen mit den erwarteten Maxima der Spannungen bzw. in den Bereichen, welche für die Konstruktion interessant sind, engmaschiger gestaltet wird. Im Fall der zu berechnenden Bauteile wird deshalb die Lagerumgebung feiner Vernetzt. Dies ist in der Abbildung 7 für die Variante 1 und in Abbildung 8 für die Variante mit dem Verbund aus Blech mit Kunststoff dargestellt.

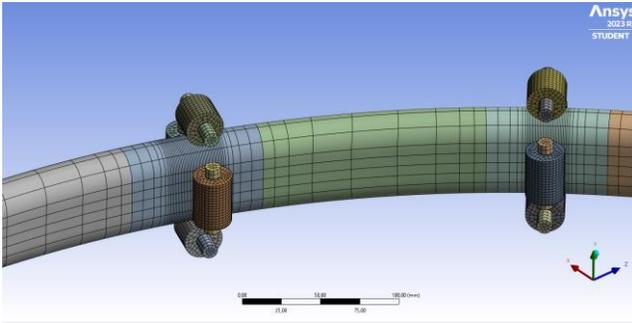


Abbildung 7: Vernetzung Variante 1

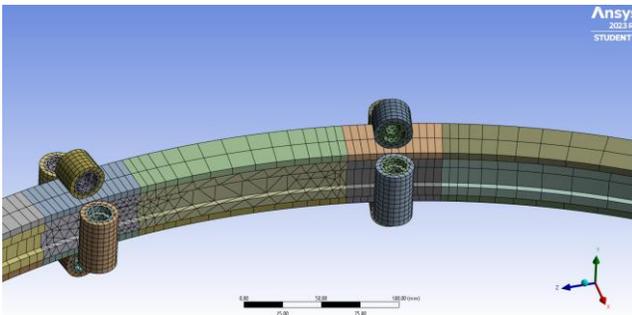


Abbildung 8: Vernetzung Variante 3 & 4

D. Lagerung, Materialkontakt und Belastung

Damit das Bauteil sich während der Simulation nicht ungewollt im Raum verschiebt, müssen die Bewegungsfreiheitsgrade für ausgewählte Flächen gezielt eingeschränkt werden. Für die Bügel bedeutet dies, dass bei Variante 1&2 die Mantelflächen der Rollenachsen (vgl. Abbildung 9) und für Variante 3&4 die innere Mantelfläche der Rollen (vgl. Abbildung 10) keine Verschiebung zulassen.

Zusätzlich zu der Lagerung müssen die Bauteilkontakte definiert werden. Hierbei ist der Kontakt zwischen den Blechen und dem PMMA Kern bei den Varianten 2-4 als Verbund definiert. In der Realität entspricht dies einer Verklebung. Die Kontaktflächen der Rollen mit den Bügel sind dabei als Reibungsfrei definiert. Der Reibungsbeiwert hat jedoch kaum Einflüsse auf die Bauteilspannungen, vor allem in einer statischen Betrachtung, weshalb hierbei lediglich wichtig ist, dass das Programm die Information erhält das zwischen den Bauteilen eine Bewegung möglich ist.

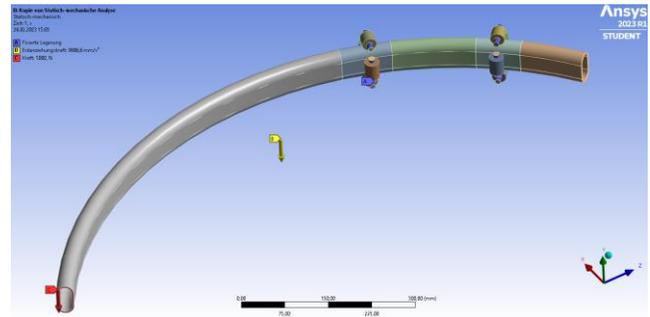


Abbildung 9: Belastungen Variante 1

Zuletzt muss dem Programm übergeben werden an welchem Punkt die Kraft von 1000 N angreift. Dieser Angriffspunkt ist dabei bei jeder Variante gleich und zwar an der äußersten Fläche des Bügels soweit wie möglich von den Lagern entfernt (vgl. Abbildung 9 und Abbildung 10 roter Pfeil und Fläche). Zusätzlich soll bei der Berechnung die Gewichtskraft des Bügels mit einbezogen werden, dabei muss lediglich dem Programm die Erdanziehung mit Richtung mitgeteilt werden, die Lage und die eigentliche Kraft berechnet das Programm eigenständig aus dem Volumen und der Dichte der Komponenten (vgl. Abbildung 9 und Abbildung 10 gelber Pfeil)

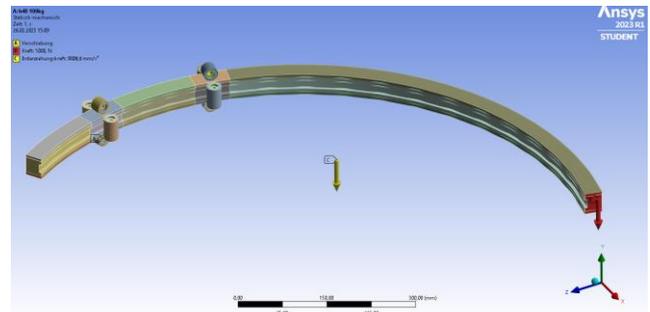


Abbildung 10: Belastungen Variante 3 & 4

III. ERGEBNISSE

Ausgewählte Ergebnisse der FEM Berechnungen sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. Dabei wird zuerst die Verformung von Variante 1 mit Kunststoffrollen (vgl. Abbildung 11) und Stahlrollen (vgl. Abbildung 12), sowie Variante 3 (vgl. Abbildung 13) aufgezeigt. Die Verformung in Y-Achse, welche die umgekehrte Richtung der Erdanziehung entspricht, dabei an dem äußersten Punkt der Modelle, bei Variante 1 einem Wert in Δy von 112 mm bzw. 73 mm für Kunststoff- bzw. Stahlrollen. Bei Variante 2 in Δy 166 mm bzw. 78 mm für Kunststoff- bzw. Stahlrollen. Für Variante 3 350 mm in Δy und für Variante 4 234 mm in Δy .

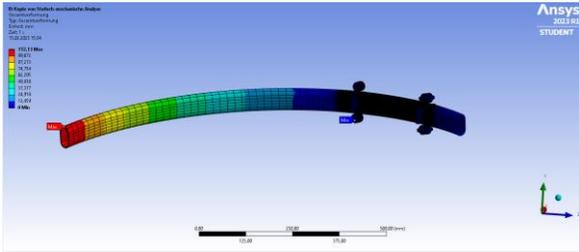


Abbildung 11: Verformung Variante 1, POM Rollen

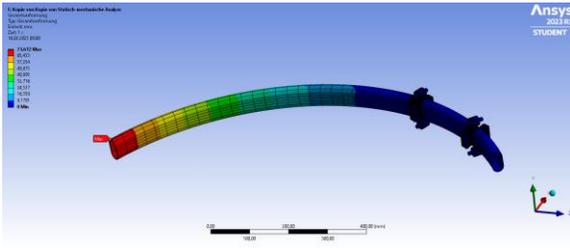


Abbildung 12: Verformung Variante 1, Stahlrollen

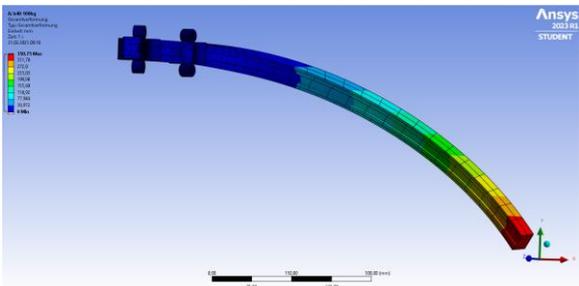


Abbildung 13: Verformung Variante 3

Die Spannungen in den Bauteilen können dabei auch nur auszugweise gezeigt werden, da sonst der Umfang dieser Arbeit überschritten wird. Daher werden nur ausgesuchte Abbildungen mit repräsentativen Spannungsverläufen abgebildet. Die Ergebnisse sind bei allen Bügeln ähnlich. Bei Variante 1 treten im Bügel Spannungen an den Kontaktflächen des Bügels mit den Rollen auf, welche die Streckgrenze des Materials geringfügig überschreiten (vgl. Abbildung 14-Abbildung 17, rot = Spannung größer als Streckgrenze des Al bzw. Stahl). Bei Variante 2 wird die Streckgrenze im Bügel nicht überschritten, wobei im POM eine Sicherheit von min. 2 gegen plastische Verformen und im Stahl min. Sicherheit 1 bei Stahlrollen und min. Sicherheit 1,7 bei Kunststoffrollen. Jedoch versagen bei den Varianten 1 & 2 die Rollen aus POM, die Rollen aus Stahl sind dabei bis an ihre Streckgrenzen belastet.

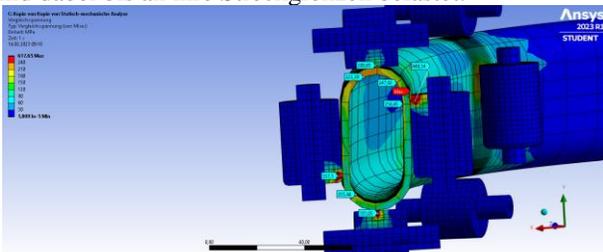


Abbildung 14: Spannung, Schnitt erste Lagerung von Belastungsseite, Variante 1, Stahlrollen

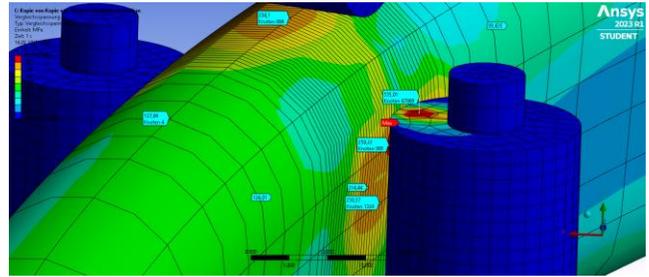


Abbildung 15: Spannung erste Lagerstelle von der Belastungsseite an der Innenseite oben von Variante 1 mit Stahlrollen

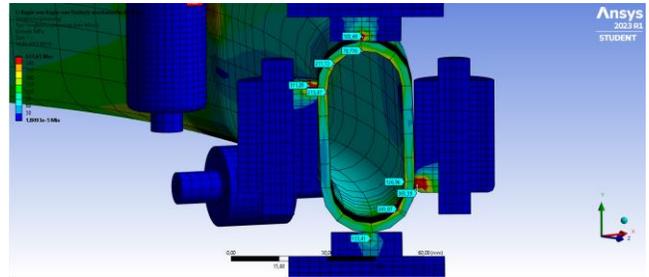


Abbildung 16: Spannung Schnitt zweite Lagerung von Belastungsseite, Variante 1, Stahlrollen

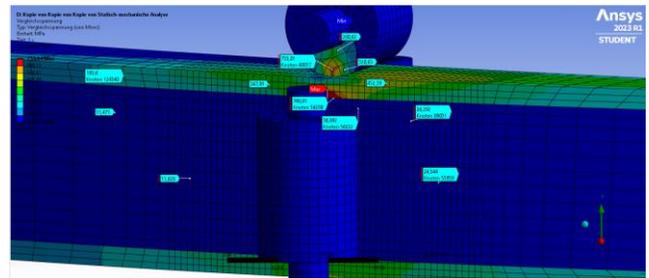


Abbildung 17: Spannung erste Lagerstelle von der Belastungsseite an der Außenseite oben, Variante 2 mit Stahlrollen

Bei Variante 3 & 4 kommt es dabei zu einer plastischen Verformung im Aluminium, zusätzlich zu der plastischen Verformung kommt es zu einem Versagen in der Verbindung der Bleche aus PMMA. Ebenso versagt auch die PUR Ummantelung der Rollen. Das Versagen bzw. die Verformung treten bei beiden Varianten auf. Dabei sind die Spannungen in den Bauteilen bei Variante 4 merklich geringer (vgl. Abbildung 18-Abbildung 20; rot = Spannung größer als Streckgrenze des Al).



Abbildung 18: Spannung Variante 3 von oben

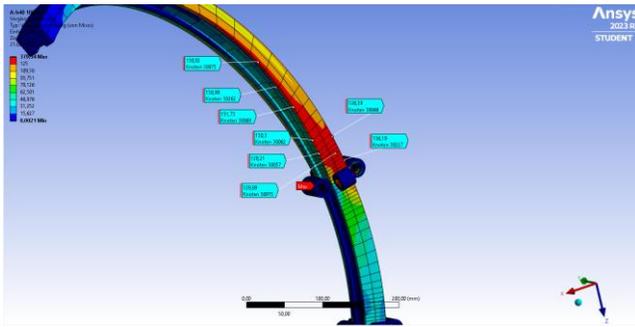


Abbildung 19: Spannung Variante 3 von unten

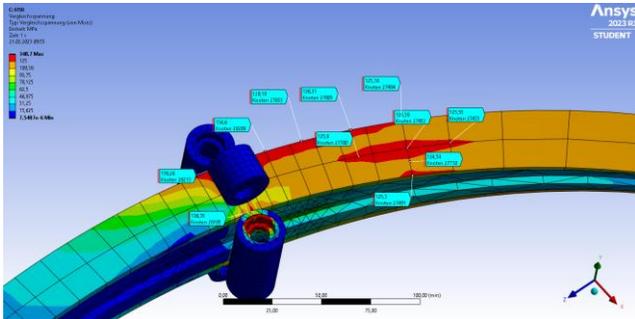


Abbildung 20: Spannung Variante 4 von oben

IV. DISKUSSION

Durch die Berechnung der Spannung in dem Bauteil kann festgestellt werden, dass keine Variante unter Einbeziehung von Sicherheitsfaktoren für die Belastung von 100 kg am Ende des Bügels ausgelegt ist. Dabei schneidet die Variante 2 mit den Stahlrollen am besten ab, da bei dieser Variante in allen Komponenten keine plastische Verformung auftritt und mit POM Rollen als Lagerung lediglich diese versagen. Auch Variante 1 zeigt Vorteile, da bei ihr lediglich im Kontaktpunkt mit den seitlichen Rollen die elastische Verformung im Bügel überschritten wird. Wie auch bei Variante 2 versagen hier die Rollen aus POM. Bei Variante 3 & 4 kommt es jedoch, bis auf den Stahlkern der Rollen, zu einem Kompletversagen des Systems.

V. FAZIT UND AUSBLICK

Aus der Berechnung der Bauteilspannung lässt sich schließen, dass alle Varianten für die betrachtete Belastung zu klein dimensioniert sind. Bezogen auf die Festigkeit ist es am besten, Variante 1 oder Variante 2 weiter zu verfolgen. Durch Anpassung der Variante 1 mit Integration einer Lauffläche statt einer Laufline für die Rollen oben und unten könnte dabei wahrscheinlich etwas von der Belastung der seitlichen Rollen und deren Kontaktpunkten mit dem Bügel auf die waagrechten Rollen verteilt werden. Zusätzlich empfiehlt es sich den Innenradius auf den Wert von Variante 3 zu verringern, wodurch nochmals die Spannungen aufgrund des kleineren Hebels reduziert werden können.

Für die Varianten 3 & 4 empfiehlt es sich statt des Aluminiumblechs auf ein Stahlblech zu wechseln. Danach entsprechen diese Varianten dann im Grunde Variante 2 nur

mit einer seitlichen Nut für ein anderes Antriebskonzept. Jedoch hat Variante 2-4 einen Nachteil, der bei der statischen Berechnung nicht mit einbezogen wurde: die Gewichte, dieser Varianten sind mindestens um den Faktor 2 höher als bei Variante 1. Dies wirkt sich nachteilig auf die kinetischen Eigenschaften des Ringsegments aus wie z.B. die Beschleunigung und seine kinetische Energie.

Um die Überlast an den Rollen bei den Varianten in den Griff zu bekommen können hierfür Stützen konstruiert werden die bei Auftreten einer gewissen Verformung den Bügel zusätzlich abstützen und somit die Rollen entlasten.

In naher Zukunft soll trotz der schlechten Ergebnisse der Berechnung Variante 3 als Prototyp gefertigt werden. Dabei ist jedoch anzumerken, dass diese Simulationen einen Extremfall darstellen, welcher durch anderweitige Maßnahmen, wie z.B. ein Herunterklappen des gesamten Bügels bei Überlastung, verhindert werden kann.

VI. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] FISCHER, Hans-Uwe: *Durchgangsschleuse*. KOCO MOTION GmbH, DE. 23.06.2022. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE 10 2020 007 871.0
- [2] WELT STAHL: *Werkstoff 1.4057 Datenblatt X17CrNi16-2 Material Härten QT800 QT900*. URL <https://www.weltstahl.com/werkstoff-1-4057-datenblatt-x17crni16-2-material/>. – Aktualisierungsdatum: 2020-09-07 – Überprüfungsdatum 2023-02-26
- [3] WELT STAHL: *DIN EN Werkstoff 1.4301 Edelstahl X5CrNi18-10 V2A Datenblatt, Zugfestigkeit, Magnetisch, Dichte, Härten*. URL <https://www.weltstahl.com/en-werkstoff-1-4301-edelstahl-x5crni18-10/>
- [4] WELT STAHL: *EN AW 5754-H111 H22; 3.3535 Aluminium AlMg3 Datenblatt*. URL <https://www.weltstahl.com/aluminium-5754/> – Überprüfungsdatum 2023-02-17
- [5] WELT STAHL: *EN AW-5083 Datenblatt Werkstoff 3.3547 Al-5083 (Almg4,5Mn)*. URL <https://www.weltstahl.com/aluminium-5083/> – Überprüfungsdatum 2023-02-17
- [6] KERN GMBH: *Polymethylmethacrylat (PMMA)*. URL <https://www.kern.de/cgi-bin/riweta.cgi?lng=1&nr=2610>. – Aktualisierungsdatum: 2023-02-13 – Überprüfungsdatum 2023-02-13
- [7] KERN GMBH: *Polyoxymethylen Homopolymer (POM-H)*. URL https://www.kern.de/de/technisches-datenblatt/polyoxymethylen-pom-h?n=1204_1. – Aktualisierungsdatum: 2023-02-25 – Überprüfungsdatum 2023-02-26
- [8] KERN GMBH: *Polyurethan kompakt (PUR 5217)*. URL https://www.kern.de/de/technisches-datenblatt/polyurethan-pur-5217?n=2861_1