

FH Münster
Fachbereich Maschinenbau

Modul: Konstruktionsprojekt
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Christian Spura
SoSe 2024

Fahrwerk Agrarroboter

Dokumentation

Berechnung

Jonas Ellwardt (1195491)

Amir Ben Arous (1213690)

6. November 2024

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Anforderungsliste	1
3. Projekt Durchführung	2
3.1. Erste Entwürfe	2
3.2. Probleme	3
4. Antriebsmotor	3
4.1. Boden mit Stoppeln	3
4.2. Nasser, schlammiger Boden	4
4.3. Asphalt	4
4.4. Motor Wahl	5
4.4.1. Zubehör	5
5. Federung / Dämpfung	7
5.1. Feder	7
5.2. Dämpfer	7
5.3. Zwischenfazit	8
6. Linearführung	9
7. Lenkungsmotor	10
7.1. Gehäuse-Lenkungsmotor	11
8. Kreuzrollenlager	12
9. Zusammenfassung	12
10.Fazit	14
A. Auslegung Antriebsmotoren	15
A.1. Trockener Boden Stoppeln	15
A.1.1. Geschwindigkeit: $v = 6km/h$	15
A.1.2. Geschwindigkeit: $v = 8km/h$	16
A.1.3. Geschwindigkeit: $v = 10km/h$	16
A.2. Nasser Boden schlammig	17
A.2.1. Geschwindigkeit: $v = 6km/h$	17
A.2.2. Geschwindigkeit: $v = 8km/h$	18
A.2.3. Geschwindigkeit: $v = 10km/h$	18

A.3. Asphalt	19
A.3.1. Geschwindigkeit: $v = 6km/h$	19
A.3.2. Geschwindigkeit: $v = 8km/h$	19
A.3.3. Geschwindigkeit: $v = 10km/h$	20
B. Auslegung Dämpfungssystem	21
B.1. Auslegung Druckfeder	21
B.1.1. Dimensionierung	21
B.1.2. Federwerkstoffe	22
B.1.3. Spannungsnachweis	23
B.2. Auslegung Dämpfer	23
B.2.1. Kräfte	23
B.3. Bolzenverbindung	24
B.3.1. Vorhandene Belastung:	24
B.3.2. Biegespannung im Bolzen	24
B.3.3. Flächenpressung am Bolzen:	24
B.3.4. Normalspannung im Wangenquerschnitt des Stangenkopfes	25
C. Auslegung Linearführung	25
C.1. Belastung	26
C.2. Lebensdauer	26
D. Auslegung Lenkungsmotoren	26
D.1. Lastdrehmoment	26
D.2. Beschleunigungsdrehmoment	26
D.2.1. Reduziertes Trägheitsmoment	26
D.3. Anlaufdrehmoment	27
E. Auslegung Kreuzrollenlager	27
E.1. Belastung	28
E.2. Lebensdauer	28
F. Befestigungsschrauben	28
F.1. Entwurf	29
F.2. Montagevorspannkraft	29
F.3. Kontrolle der Flächenpressung unter dem Schraubenkopf	30
F.4. Statischer Nachweis	30
F.5. Zwischenfazit	30
G. Datenblätter	31
G.1. Datenblatt-Feder	31

G.2. Datenblatt-Lenkungsmotor	32
G.3. Datenblatt-Stoßdämpfer	33
H. 2D-Zeichnung	34
H.1. Bolzen	34
H.2. Antriebsmotor	35

Abbildungsverzeichnis

1.	Erstes Fahrwerkmodel mit Rahmen	2
2.	MOTEUR AGRICOLE UNIVERSEL 1000W	5
3.	Reifen 4.00-7 V-8818 4PR TT	6
4.	Angepasster Entwurf (Beidseitige Lagerung)	6
5.	Druckfeder: D-313G	7
6.	Stoßdämpfer	8
7.	Einstellschraube	9
8.	Liearkugellager LMUF30G	9
9.	Fahrwerk Unterseite	10
10.	Schrittmotor: SHW86118-18-600	11
11.	Gehäuse-lenkungsmotor	11
12.	Kreuzrollenlager	12
13.	Fertiges Fahrwerk	13
14.	Fertiges Fahrwerk im Schnitt	14

1. Einleitung

Die FH Münster nimmt seit einigen Jahren am internationalen Field Robot Event teil und hat schon einige gute Platzierungen erreicht. Um konkurrenzfähig zu bleiben, wird nun an einem neuen Roboter gearbeitet dem CERES 3, der den Vorgänger (CERES 2) ablösen soll. Im Rahmen des Moduls Konstruktionsprojekt soll ein Fahrwerk für den CERES 3 entwickelt werden. Zusammen mit dem Team des Agrarroboters wurden die Anforderungen an das Fahrwerk festgelegt. Im Rahmen der Projektarbeit sollen die Anforderungen best möglich erfüllt werden.

2. Anforderungsliste

Aus den Erfahrungen und Wünschen der Teammitglieder wurden folgende Anforderungen an das Fahrwerk gestellt.

Allgemeine Anforderungen:

- Fahren auf: Asphalt, Acker und schlammiger Boden
- Traglast: $50kg$
- Eigengewicht: $60 - 150kg$
- Temperaturen bis: $40^{\circ}C$
- Guter Schutz gegen Wasser und Verschmutzungen

Spezielle Anforderungen:

- Bodenfreiheit zwischen Acker und Fahrwerk: min. $150mm$
- Bodenfreiheit zwischen Acker und Unterseite des Rahmens: min. $450mm$
- Breite des Reifens: max. $100mm$
- Allradantrieb
- 360° drehbare Lenkung jedes Reifens
- Anschluss an den verstellbaren Rahmen
- Elektrische Anschlüsse: Strom und Datenkabel
- Rücksichtnahme auf die Längen- und Breitenverstellung
- Zuglast für einen Anhänger mit Schar von min. $975N$ pro Schar

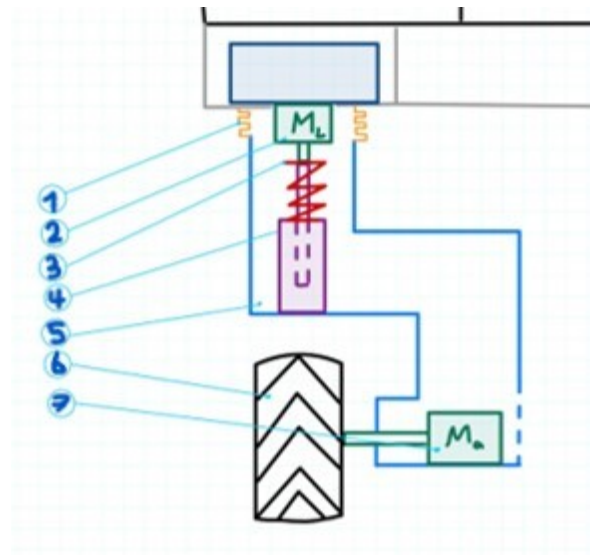
3. Projekt Durchführung

Zu Beginn des Projektes wurden viele Ideen gesammelt, erste Entwürfe und Modelle erstellt und wieder verworfen. Einige wichtige Grundbausteine wurden aber in diesem Prozess bereits festgelegt.

3.1. Erste Entwürfe

Das Fahrwerk soll Folgendes enthalten:

1. Dichtung
2. Lenkungsmotor
3. Schraubenfeder
4. Stoßdämpfer
5. Gehäuse
6. Rad
7. Antriebsmotor



Daraus wurden die ersten CAD-Modelle abgeleitet.

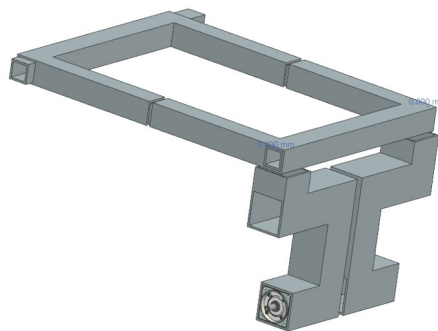


Abbildung 1: Erstes Fahrwerkmodell mit Rahmen

Hier traten die ersten Probleme auf.

3.2. Probleme

Wie auf der Abbildung 1 zu erkennen ist, ist der Abstand zwischen den beiden Gehäusen viel zu gering, um eine Drehbewegung der Räder zu zulassen. Dies ist auf den großen Bauraum des Motors zurückzuführen. Der Bauraum ist den hohen Leistungsanforderungen des Motors geschuldet, die durch die große Zuglast hervorgerufen werden. Es sah nicht realistisch aus, dass diese sehr großen Leistungen in den gewünschten Maßen des Roboters darzustellen wären. Zunächst wurde der Rechenweg überprüft. Hierbei unterstützte uns Professor Große Gehling, der unter anderem Landmaschinentechnik an der FH-Münster lehrt. Unsere Vorgehensweise für die Auslegung und die Berechnungen wurden von ihm bestätigt (s. [Auslegung Antriebsmotoren](#)). Problematisch blieb weiterhin die hohe Leistungsanforderung. Nach Rücksprache mit dem Team fiel die Wahl auf einen Radnabenmotor. So konnte der Bauraum verringert werden.

4. Antriebsmotor

Der Antriebsmotor muss in verschiedenen Szenarien und bei verschiedenen Geschwindigkeiten funktionieren. Hierzu wurden drei verschiedene Böden mit jeweils drei verschiedenen Geschwindigkeiten betrachtet (für die Berechnung siehe [Auslegung Antriebsmotoren](#)).

1. Boden mit Stoppeln
2. Nasser, schlammiger Boden
3. Asphalt

4.1. Boden mit Stoppeln

Als erstes Szenario wird der Boden mit Stoppeln betrachtet. Dieser ist für den Wettkampf maßgebend. Da auf diesem Untergrund alle Wettfahrten durchgeführt werden, wenn es nicht regnet.

Durch die Bodeneigenschaften konnten folgende Zugkräfte erreicht werden:

- Zuglast pro Rad: $294,3N$
- Zuglast gesamter Roboter: $1177,2N$

Geschwindigkeit / Parameter	Leistung pro Motor	Drehmoment pro Motor	Drehzahl
$v = 6m/s$	$0,572kW$	$65,24Nm$	$83,8min^{-1}$
$v = 8m/s$	$0,763kW$	$65,24Nm$	$111,7min^{-1}$
$v = 10m/s$	$0,954kW$	$65,24Nm$	$139,6min^{-1}$

4.2. Nasser, schlammiger Boden

Der nasse, schlammige Boden ist ein Worst Case Szenario im Wettkampf und sollte daher ebenfalls beachtet werden.

Durch die Bodeneigenschaften können folgende Zugkräfte erreicht werden:

- Zuglast pro Rad: $147,15N$
- Zuglast gesamter Roboter: $588.6N$

Auf diesem Untergrund kann kein Ahnhänger mit einem Schar gezogen werden, da ein Schar mit etwa $975N$ Zuglast braucht.

Geschwindigkeit / Parameter	Leistung pro Motor	Drehmoment pro Motor	Drehzahl
$v = 6m/s$	$0,327kW$	$37,28Nm$	$83,8min^{-1}$
$v = 8m/s$	$0,436kW$	$37,28Nm$	$111,7min^{-1}$
$v = 10m/s$	$0,545kW$	$37,28Nm$	$139,6min^{-1}$

Im Wettkampf könnte man in erwägung ziehen das Gewicht zu erhöhen, da dies zu einer höheren Zugkraft führt.

4.3. Asphalt

Da der Roboter sich nicht ausschließlich auf den Feld bewegen, sondern auch über den Campus fahren soll, ist die Beachtung der Leistungsanforderungen für Asphalt ebenfalls von großem Interesse.

Durch die Bodeneigenschaften können folgende Zugkräfte erreicht werden:

- Zuglast pro Rad: $441,45N$
- Zuglast gesamter Roboter: $1765.8N$

Diese nehmen großen Einfluss auf die Leistung des Motors.

Geschwindigkeit / Parameter	Leistung pro Motor	Drehmoment pro Motor	Drehzahl
$v = 6m/s$	$0,817kW$	$93,195Nm$	$83,8min^{-1}$
$v = 8m/s$	$1,090kW$	$93,195Nm$	$111,7min^{-1}$
$v = 10m/s$	$1,362kW$	$93,195Nm$	$139,6min^{-1}$

4.4. Motor Wahl

Anhand der gegebenen Anforderungen wurde folgender Motor gewählt:



Abbildung 2: MOTEUR AGRICOLE UNIVERSEL 1000W

2D-Zeichnung: (s. Anhang [H.2](#))

Motor Daten:

Leistung: 1000 W

Drehmoment: $T_{max} = 80 \text{ Nm}$

Spannung: 24 V, 36 V, 48 V

Geschwindigkeit: 6 km/h, 8 km/h, 10 km/h

Hierbei fällt auf, dass die Leistung des Motors nicht der notwendigen Anforderung für Asphalt-Untergrund entspricht. Zu beachten ist jedoch, dass auf diesem Untergrund kein Schar gezogen wird, sondern ein Anhänger. Hierbei muss ausschließlich die Rollreibungskraft überwunden werden. Für diesen Fall wurde die maximale Zuglast bzw. Zuggewicht ermittelt. Sie lauten wie folgt:

Geschwindigkeit / Parameter	Motorleistung	Zuglast	Zuggewicht
$v = 6 \text{ m/s}$	$0,817 \text{ kW}$	1765,80 N	1800 kg
$v = 8 \text{ m/s}$	$1,000 \text{ kW}$	1603,93 N	1635 kg
$v = 10 \text{ m/s}$	$1,000 \text{ kW}$	1243,91 N	1268 kg

(für die Berechnung s. [Asphalt](#)).

4.4.1. Zubehör

Zum gewählten Motor gibt es sowohl Felgen als auch Reifen, die für den landwirtschaftlichen Gebrauch geeignet sind.

- **Reifen:** <https://protempo-online.de/reifen-4.00-7-v-8818-4pr-tt/800.400.700.418>



Abbildung 3: Reifen 4.00-7 V-8818 4PR TT

Wichtige Daten:

Außendurchmesser: $d = 380 \text{ mm}$ | Breite: $b = 114 \text{ mm}$

Tragfähigkeit: 150 kg | Druck: $2,5 \text{ BAR}$

Anhand dieser Grundlage wurde das erste Modell angepasst.

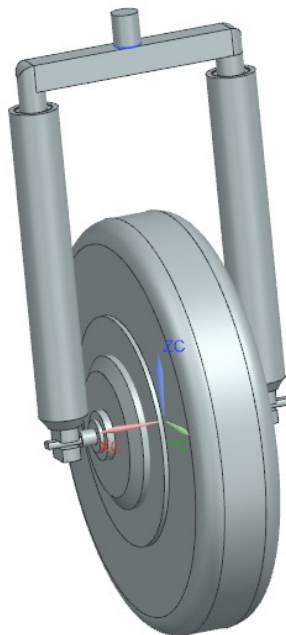


Abbildung 4: Angepasster Entwurf (Beidseitige Lagerung)

5. Federung / Dämpfung

Damit die technischen Komponenten wie Kameras oder Sensoren einwandfrei arbeiten können, soll das Fahrwerk eine Feder-Dämpferkombination beinhalten. Diese soll dafür sorgen, dass zum einen die Eigenlast gefedert wird, und zum anderen die Schwingungen, die durch den Untergrund entstehen, aufgenommen werden.

5.1. Feder

Die primäre Aufgabe der Feder ist es, die Eigenlast zu tragen. Als Form der Feder wurde eine zylindrische Schraubenfeder gewählt. Die genaue Berechnung der einzelnen Daten des Dämpfungssystems befindet sich unter [Auslegung Druckfeder](#).

Gewählte Feder: <https://www.federnshop.com/de/produkte/druckfedern/d-313g.html>



Abbildung 5: Druckfeder: D-313G

Datenblatt: [siehe [G.1](#) im Anhang]

Wichtige Daten:

Höchste Kraft der Feder: $F_n = 392,101 \text{ N}$

Größter statischer Federweg: $s_n = 60,28 \text{ mm}$

Dynamische Höchstkraft: $F_{ndyn} = 375,886 \text{ N}$

Größter dynamischer Federweg: $s_{hdyn} = 23,99 \text{ mm}$

Äußere Windungsdurchmesser: $D_e = 40 \text{ mm}$

Ungespannte Länge der Feder: $l_0 = 92,8 \text{ mm}$

5.2. Dämpfer

Der Dämpfer hat die Aufgabe, die Schwingungen zu dämpfen, die durch äußere Einflüsse auf das Fahrwerk wirken. Zudem soll die Kräfte, die durch das Zusammendrücken der Feder entsteht, in Wärmeenergie umgewandelt werden, um den Roboter möglichst in einer ruhigen Lage zu

halten. Da die exakte Auslegung der auftretenden Schwingungen und äußeren Belastungen nur experimentell ermittelt werden können, wurde die Auslegung des Dämpfers überschlagen (s. [Auslegung des Dämpfers](#)).

Aus der Berechnung geht hervor:

- **Zugkraft:** $F_a = 100N$
- **Druckkraft:** $F_e = 10N$

Mit diesen Angaben wurde der Dämpfer 'STAB-O-SHOC HD15' gewählt.

Datenblatt: [siehe [G.3](#) im Anhang]

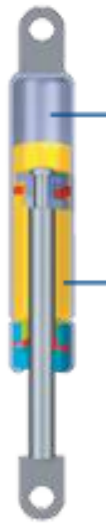


Abbildung 6: Stoßdämpfer

5.3. Zwischenfazit

Für die Montage des Stoßdämpfers wurden die folgenden Köpfe (*K2 und D0*) gewählt [s. [G.3](#) im Anhang]. Dabei ist ein Bolzen vorgesehen. Dies wurde im Kapitel [Bolzenverbindung](#) berechnet. Demzufolge einen Bolzen **ISO 2340-A-6h11x18**[\[H.1\]](#) gewählt.

Nach der Auslegung des Stoßdämpfers wurde festgelegt, dass der Hubweg des Dämpfers mit dem Federweg der Druck belasteten Feder nicht übereinstimmt. Deshalb muss im weiteren Verlauf, die Feder mit einer Kraft von $F_1 = 50,32N$ vorgespannt werden. Dadurch werden die beide oben genannten Wege angenähert. Zu beachten ist dabei, dass das gesamte Gewicht des Roboters sowie die Traglast unterhalb 210kg bleibt. Es verbleibt eine Tragreserve. Zum einstellen der Vorspannung wurde eine Einstellschraube ausgelegt. Diese soll die folgenden Aufgaben erfüllen. Erstens wirkt sie als Spannmittel für den Druckfeder, indem sie runter und hoch geschraubt wird. Zweitens besitzt sie ein Gewinde, in dass der Stoßdämpfer eingeschraubt wird. Durch dieses Anordnung lassen sich Dämpfer und Feder jederzeit einstellen. .

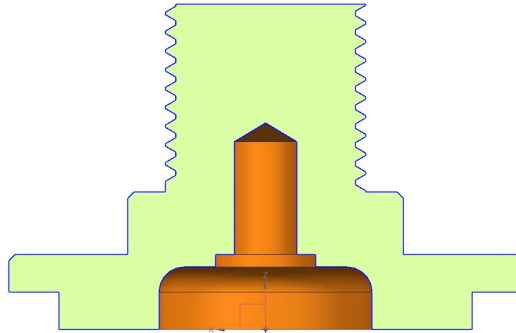


Abbildung 7: Einstellschraube

6. Linearführung

Für die sichere lineare Bewegung, die auf die Feder wirken, soll wurde ein Linearkugellager gewählt. Die Berechnung ist unter [Auslegung Linearführung](#) zu finden. Durch den Bauraum der Feder wurde die Auswahl eingegrenzt und das LMUF30G gewählt.



Abbildung 8: Liearkugellager LMUF30G

Durch die Festlegung der Bauteile Feder, Dämpfer und der Linearführung muss das untere Teil des Fahrwerkes angepasst werden.

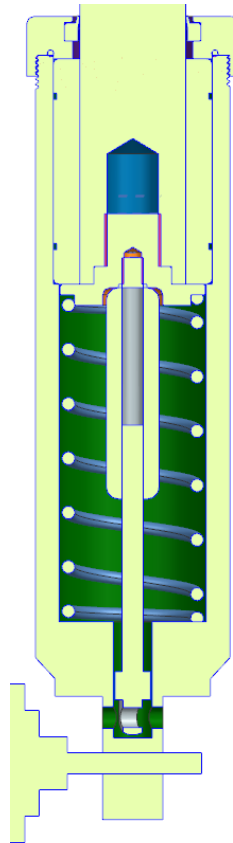


Abbildung 9: Fahrwerk Unterseite

Das Linearkugellager wird mit der Hilfe eines Deckels und dem Absatz im Gehäuse fixiert. Um die gesamte Unterseite gegen Verunreinigungen zu schützen wurden an den kritischen Stellen (zwischen Gabel und Deckel und Deckel und Gehäusewand Dichtelemente verbaut).

7. Lenkungsmotor

Ein Hauptmerkmal des neuen Roboters ist die 360° drehbare Lenkung jedes Reifens. Dafür werden vier Lenkungsmotoren benötigt, nämlich Servo- bzw. Schrittmotoren, um die genauen Winkel beim Lenken einstellen zu können. Hierbei spielt auch wieder der Bauraum eine große Rolle. Denn eine der wichtigsten Anforderung ist es, eine Bodenfreiheit zwischen Acker und Unterseite des Rahmens von min. 450 mm zu halten. Gleichzeitig soll das Fahrwerk nicht zu hoch sein, um andere Probleme, wie einen hohen Schwerpunkt, zu vermeiden. Deshalb wurde es vorgeschlagen, dass die Lenkungsmotoren innerhalb des Oberkasten des Roboters zu platzieren. Das wurde aber vom Team abgelehnt.

Nach dem Kapitel [Auslegung Lenkungsmotor](#) wurde dem folgenden Motor gewählt: <https://www.transmotec.de/product/SHW86118-18-600/>

Datenblatt: [siehe [G.2](#) im Anhang]

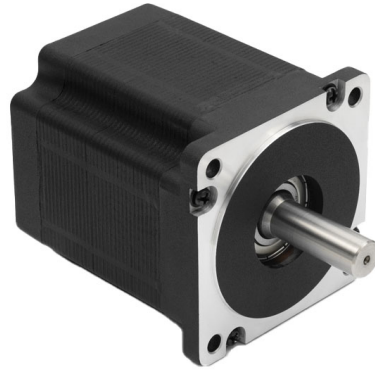


Abbildung 10: Schrittmotor: SHW86118-18-600

Wichtige Daten:Drehmoment: $T = (8,5) \text{ Nm}$

Spannung: 24 V

Schrittwinkel: $1,8^\circ$ **7.1. Gehäuse-Lenkungsmotor**

Zum schonen der Welle des Lenkungsmotor und zur Verbindung des Fahrwerks mit dem Oberkasten ist ein Gehäuse konstruiert worden. Das Gehäuse spielt hierbei eine zentrale Rolle, da es verschiedene Belastungen aufnimmt. Somit werden die anderen Bauteile entlastet. Beispielsweise ist die durch das Anfahrmoment hervorgerufene Biegung oder die durch die Lagerung der Welle des Lenkungsmotors verursachte Radialkräfte zu erwähnen.

Für die Fixierung des Gehäuses mit der Oberkasten des Roboters, wurden 8 Befestigungsschrauben und eine Zentrierungsnut gewählt (mehr dazu siehe Kapitel [Befestigungsschrauben](#)).

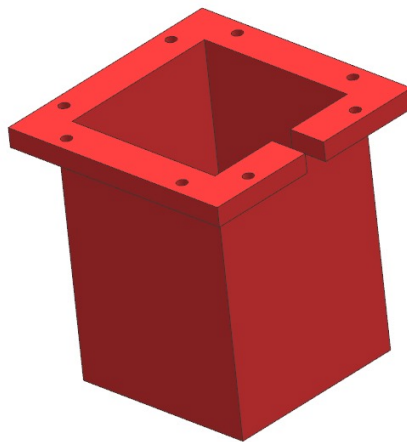


Abbildung 11: Gehäuse-lenkungsmotor

8. Kreuzrollenlager

Da die Achse des Lenkungsmotors nicht mit Biegung belastet werden darf, wurde ein Kreuzrollenlager (XV40) gewählt. Dieses nimmt nicht nur Radial- und Axialkräfte auf, sondern auch Kipp Momente. Dadurch dass nur ein Lager benötigt wird und nicht mehrere, ist die Verwendung sehr Bauraum effizient. Die genaue Berechnung ist in Anhang E Auslegung Kreuzrollenlager zu finden.



Abbildung 12: Kreuzrollenlager

9. Zusammenfassung

Am Anfang des Projekt wurde eine große Anzahl von Forderungen an das Fahrwerk gestellt. Zum einen soll es dem Roboter möglich sein, auf verschiedenen Untergründen zu fahren. Dies wurde möglich durch den gewählten Motor ermöglicht. Die Konstruktion und die Rechennachweise stellen sicher, dass das Fahrwerk die gesamte Last des Roboters tragen kann. Zum Schutz vor Verschmutzung, wurden an kritischen Stellen Dichtelemente eingebaut oder Komponenten gewählt, welche sich durch ihre Bauart selbst schützen. Der gewählte Reifen ermöglicht, dass die geforderte Bodenfreiheit von min. 150mm gewährleistet ist. Die Breite des Reifens übersteigt die maximal Breite von 100mm um 14mm. Durch die geforderte Bodenfreiheit zwischen Fahrwerk und Boden ist dies ein Kompromiss, da es keine Reifen in der Größe gibt, die schmalere sind und ein Agrar-Profil besitzen. Desweiteren ist durch die Nutzung der vier Lenkungsmotoren die 360° Lenkung gewährleistet. Durch die Wahl eines Schrittmotors ist die Lenkung nicht

stufenlos. Das sollte aber kein Problem darstellen, da der Schrittwinkel bei $1,8$ liegt. Bei einer realistischen Geschwindigkeit von 6m/s auf einem Ackerboden mit Stoppeln konnte die geforderte Zuglast von min. 975N pro Schar erreicht werden. Mit einer Zuglast von $1177,2\text{N}$ ist es auf jeden Fall möglich, einen Schar zu ziehen. Mit den Bohrungen am Gehäuse ist es möglich, das gesamte Fahrwerk unter den Rahmen des Roboters zu schrauben. Durch die gesamte Höhe des Fahrwerks von $585,5\text{mm}$ ist die geforderte Bodenfreiheit von min. 450mm deutlich erreicht. Hierbei sollte aber bedacht werden, dass durch ein sehr hohes Fahrwerk der Schwerpunkt des Roboters sehr hoch liegt. Dies kann evtl. zu einer Kippgefahr werden. Die Motoren müssen mit Strom versorgt werden. Da sich durch die 360 Lenkung, ein Kabel bis zum zerreißen um das Fahrwerk wickeln würde, ist mit dem Agrarroboter Team abgesprochen das bei der Programmierung darauf geachtet wird das sich das Fahrwerk nie mehr als 420 dreht. Es muss also darauf geachtet werden, dass ein Kabelüberschuss für eine 420 Drehung vorhanden ist.

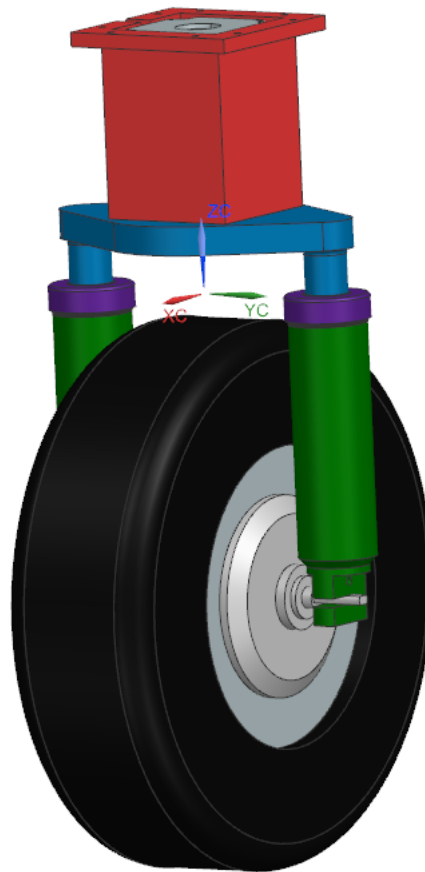


Abbildung 13: Fertiges Fahrwerk

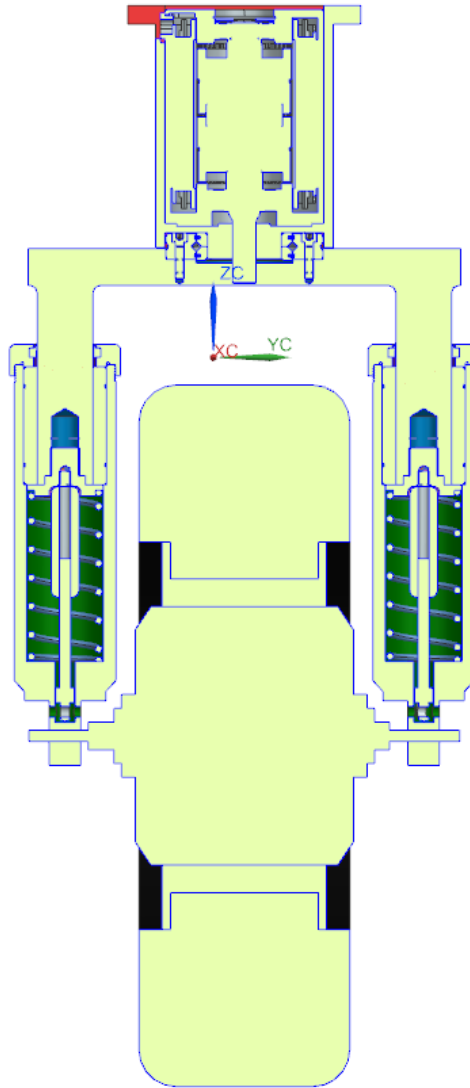


Abbildung 14: Fertiges Fahrwerk im Schnitt

10. Fazit

Über das Semester wurden immer wieder verschiedene Änderungen und Anpassungen vorgenommen. Zum Abschluss des Projektes ist ein Fahrwerk entstanden, welches ein Großteil der Anforderungen, die zu Beginn gestellt wurden erfüllt. Mit dem Blick in die Zukunft auf den nächsten Teil des CERES 3 den Oberkasten, müssen bestimmt noch kleine Anpassungen und Änderungen vorgenommen werden. Das Team des Agrarroboters, sollte sich überlegen ob die Höhe des Fahrwerkes nicht doch noch durch eine gute Positionierung der Lenkungsmotoren noch herab gesetzt werden kann.

Anhang

A. Auslegung Antriebsmotoren

Quelle:[4]

Da der Motor auf den geforderten Untergründen verschiedene Leistungen bringen muss, wird die notwendige Leistung für die verschiedenen Böden berechnet. Die unterschiedlichen Eigenschaften des jeweiligen Bodens, werden über den Traktionskoeffizienten X in der Rechnung beachtet. Zudem ist die Geschwindigkeit auch im Bezug auf den Wettkampf von Interesse. Hierzu wurden die Geschwindigkeiten von $6m/s$, $8m/s$ und $10m/s$ für die Rechnung genutzt.

Gefordert:

- Allradantrieb
- Eigengewicht : $m_e = 150Kg$
- Traglast : $m_t = 50Kg$
- Bodenfreiheit : $h \geq 150mm$

A.1. Trockener Boden Stoppeln

Traktionskoeffizient : $X = 0,6$

Reibungskoeffizient : $\mu = 0,1$

A.1.1. Geschwindigkeit: $v = 6km/h$

Gewichtskraft pro Rad:

$$F_{NR} = \frac{m_e + m_t}{4} kg * 9,81m/s^2 = 490,5N$$

Reibungskraft am Rad:

$$F_R = F_{NR} * \mu = 49,5N$$

Zugkraft pro Rad:

$$F_{ZR} = F_{NR} * X = 294,3N$$

Motorlast pro Rad:

$$F_{MR} = F_{ZR} + F_R = 343,35N$$

Drehmoment pro Motor:

$$M_R = F_{MR} * d = 65,24Nm \quad || \quad d = 0,38m(s.u.)$$

Drehzahl:

$$n = \frac{v * 1000}{\pi * d * 60} = 83,8min^{-1}$$

Leistung pro Motor:

$$P = \frac{M_R * n}{9550} = 0,572kw$$

A.1.2. Geschwindigkeit: $v = 8km/h$

Gewichtskraft pro Rad:

$$F_{NR} = \frac{m_e + m_t}{4} kg * 9,81m/s^2 = 490,5N$$

Reibungskraft am Rad:

$$F_R = F_{NR} * \mu = 49,5N$$

Zugkraft pro Rad:

$$F_{ZR} = F_{NR} * X = 294,3N$$

Motorlast pro Rad:

$$F_{MR} = F_{ZR} + F_R = 343,35N$$

Drehmoment pro Motor:

$$M_R = F_{MR} * d = 65,24Nm \quad || \quad d = 0,38m(s.u.)$$

Drehzahl:

$$n = \frac{v * 1000}{\pi * d * 60} = 111,7min^{-1}$$

Leistung pro Motor:

$$P = \frac{M_R * n}{9550} = 0,763kw$$

A.1.3. Geschwindigkeit: $v = 10km/h$

$$\text{Gewichtskraft pro Rad: } F_{NR} = \frac{m_e + m_t}{4} kg * 9,81m/s^2 = 490,5N$$

$$\text{Reibungskraft am Rad: } F_R = F_{NR} * \mu = 49,5N$$

$$\text{Zugkraft pro Rad: } F_{ZR} = F_{NR} * X = 294,3N$$

Motorlast pro Rad: $F_{MR} = F_{ZR} + F_R = 343,35N$

Drehmoment pro Motor:

$$M_R = F_{MR} * d = 65,24Nm \quad || \quad d = 0,38m(s.u.)$$

Drehzahl:

$$n = \frac{v * 1000}{\pi * d * 60} = 139,6min^{-1}$$

Leistung pro Motor:

$$P = \frac{M_R * n}{9550} = 0,954kW$$

A.2. Nasser Boden schlammig

Traktionskoeffizient : $X = 0,3$

Reibungskoeffizient : $\mu = 0,1$

A.2.1. Geschwindigkeit: $v = 6km/h$

Gewichtskraft pro Rad:

$$F_{NR} = \frac{m_e + m_i}{4} kg * 9,81m/s^2 = 490,5N$$

Reibungskraft am Rad:

$$F_R = F_{NR} * \mu = 49,5N$$

Zugkraft pro Rad:

$$F_{ZR} = F_{NR} * X = 147,15N$$

Motorlast pro Rad:

$$F_{MR} = F_{ZR} + F_R = 196,2N$$

Drehmoment pro Motor:

$$M_R = F_{MR} * d = 37,28Nm \quad || \quad d = 0,38m(s.u.)$$

Drehzahl:

$$n = \frac{v \cdot 1000}{\pi \cdot d \cdot 60} = 83,8 \text{ min}^{-1}$$

Leistung pro Motor:

$$P = \frac{M_R \cdot n}{9550} = 0,327 \text{ kW}$$

A.2.2. Geschwindigkeit: $v = 8 \text{ km/h}$

$$\text{Gewichtskraft pro Rad: } F_{NR} = \frac{m_e + m_t}{4} \cdot g \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 490,5 \text{ N}$$

$$\text{Reibungskraft am Rad: } F_R = F_{NR} \cdot \mu = 49,5 \text{ N}$$

$$\text{Zugkraft pro Rad: } F_{ZR} = F_{NR} \cdot X = 147,15 \text{ N}$$

$$\text{Motorlast pro Rad: } F_{MR} = F_{ZR} + F_R = 343,35 \text{ N}$$

$$\text{Drehmoment pro Motor: } M_R = F_{MR} \cdot d = 37,28 \text{ Nm} \quad || \quad d = 0,38 \text{ m (s.u.)}$$

$$\text{Drehzahl: } n = \frac{v \cdot 1000}{\pi \cdot d \cdot 60} = 111,7 \text{ min}^{-1}$$

$$\text{Leistung pro Motor: } P = \frac{M_R \cdot n}{9550} = 0,436 \text{ kW}$$

A.2.3. Geschwindigkeit: $v = 10 \text{ km/h}$

$$\text{Gewichtskraft pro Rad: } F_{NR} = \frac{m_e + m_t}{4} \cdot g \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 490,5 \text{ N}$$

$$\text{Reibungskraft am Rad: } F_R = F_{NR} \cdot \mu = 49,5 \text{ N}$$

$$\text{Zugkraft pro Rad: } F_{ZR} = F_{NR} \cdot X = 147,15 \text{ N}$$

$$\text{Motorlast pro Rad: } F_{MR} = F_{ZR} + F_R = 343,35 \text{ N}$$

$$\text{Drehmoment pro Motor: } M_R = F_{MR} \cdot d = 37,28 \text{ Nm} \quad || \quad d = 0,38 \text{ m (s.u.)}$$

$$\text{Drehzahl: } n = \frac{v \cdot 1000}{\pi \cdot d \cdot 60} = 139,6 \text{ min}^{-1}$$

$$\text{Leistung pro Motor: } P = \frac{M_R \cdot n}{9550} = 0,545 \text{ kW}$$

A.3. Asphalt

Traktionskoeffizient : $X = 0,9$

Reibungskoeffizient : $\mu = 0,1$

A.3.1. Geschwindigkeit: $v = 6\text{km/h}$

Gewichtskraft pro Rad:

$$F_{NR} = \frac{m_e + m_t}{4} kg * 9,81\text{m/s}^2 = 490,5N$$

Reibungskraft am Rad:

$$F_R = F_{NR} * \mu = 49,5N$$

Zugkraft pro Rad:

$$F_{ZR} = F_{NR} * X = 441,45N$$

Zuggewicht:

$$m_z = \frac{F_{ZR} * 4}{\mu * g} = 1800\text{kg}$$

Motorlast pro Rad:

$$F_{MR} = F_{ZR} + F_R = 490,5N$$

Drehmoment pro Motor:

$$M_R = F_{MR} * d = 93,195Nm \quad || \quad d = 0,38m$$

Drehzahl:

$$n = \frac{v * 1000}{\pi * d * 60} = 83,8\text{min}^{-1}$$

Leistung pro Motor:

$$P = \frac{M_R * n}{9550} = 0,817kw$$

A.3.2. Geschwindigkeit: $v = 8\text{km/h}$

Gewichtskraft pro Rad:

$$F_{NR} = \frac{m_e + m_t}{4} kg * 9,81\text{m/s}^2 = 490,5N$$

Reibungskraft am Rad:

$$F_R = F_{NR} * \mu = 49,5N$$

Zugkraft pro Rad:

$$F_{ZR} = F_{NR} * X = 441,45N$$

Motorlast pro Rad:

$$F_{MR} = F_{ZR} + F_R = 490,5N$$

Drehmoment pro Motor:

$$M_R = F_{MR} * d = 93,195Nm \quad || \quad d = 0,38m$$

Drehzahl:

$$n = \frac{v*1000}{\pi*d*60} = 111,7min^{-1}$$

Leistung pro Motor:

$$P = \frac{M_R*n}{9550} = 1,090kw$$

Mögliches Zuggewicht:

Mögliche Zuglast:

$$F_{Z'} = P * \frac{9550*4}{n*\frac{d}{2}} - F_R * 4 = 1603,93N \quad || P = 1kN$$

$$m_z = \frac{F_{Z'}*4}{\mu*g} = 1635kg$$

A.3.3. Geschwindigkeit: $v = 10km/h$

Gewichtskraft pro Rad:

$$F_{NR} = \frac{m_e+m_t}{4}kg * 9,81m/s^2 = 490,5N$$

Reibungskraft am Rad:

$$F_R = F_{NR} * \mu = 49,5N$$

Zugkraft pro Rad:

$$F_{ZR} = F_{NR} * X = 441,45N$$

Motorlast pro Rad:

$$F_{MR} = F_{ZR} + F_R = 490,5N$$

Drehmoment pro Motor:

$$M_R = F_{MR} * d = 93,195Nm \quad || \quad d = 0,38m$$

Drehzahl:

$$n = \frac{v*1000}{\pi*d*60} = 139,6min^{-1}$$

Leistung pro Motor:

$$P = \frac{M_R * n}{9550} = 1,362 \text{ kw}$$

Mögliche Zuglast:

$$F_{Z'} = P * \frac{9550 * 4}{n * \frac{d}{2}} - F_R * 4 = 1243,91 \text{ N} \quad || P = 1 \text{ kN}$$

$$m_z = \frac{F_{Z'} * 4}{\mu * g} = 1268 \text{ kg}$$

B. Auslegung Dämpfungssystem

Aufgrund des hohen angestrebten Gewichtes und den Unebenheiten eines Ackerfeldes, ist für das Dämpfungssystem eine Kombination aus einer Druckfeder und einem Stoßdämpfer vorgesehen. Die Druckfeder soll dafür sorgen, das Eigen- und Traggewicht zu federn, währenddessen hemmt der Stoßdämpfer die Anregungen der Fahrbahn.

B.1. Auslegung Druckfeder

Quelle: Nach (A.10-4) [2]

Für die Federung des Eigen- und Traggewichtes des Roboters kam der Auswahl auf einen Schraubenfeder, der sich durch seine hohe Werkstoffausnutzung und seines geringeren Eigengewichtes. Die 8 Druckfedern, 2 pro Aufhängen, sollen eine Leistung bringen, womit sie, sowohl bei einer dynamischen Belastung als auch einer Statischen, der 150 kg schwere Roboter zzgl. Ladung von bis zu 50 kg schwer tragen können. Gleichzeitig sind einige Details zu betrachten, wie die gesamte Länge des Fahrwerks sowie den Abstand zwischen dem Rad und der Unterkante des Fahrwerks. Dafür sollten schon paar Parametern, wie es unten steht, vorgewählt. Gegeben:

Fall	Federkraft F_{xx} [N]	Federweg s_{xx} [mm]
1	187,5	30
2	250	40
n	312,5	50

B.1.1. Dimensionierung

Federrate:

$$R_{soll} = \frac{F_2 - F_1}{s_2 - s_1} = 6,25 \text{ MPa}$$

Überschlägiger Drahtdurchmesser:

$$d = k_1 \sqrt[3]{F n * D_e} = 3,48 \text{ mm} \quad || D_e = 40 \text{ mm, Drahtsorte: DH, } d < 5 \text{ mm} \rightarrow k_1 = 0,15$$

gewählt: $d = 3,40 \pm 0,30 \text{ mm}$

—> mittlere Windungsdurchmesser: $D = 36,6 \text{ mm}$

—> innere Windungsdurchmesser: $D_i = 33 \text{ mm}$

Anzahl der wirksamen Windungen:

$$n_f = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D^3 \cdot R_{soll}} = 4,44 \quad || \text{ runder Federstahldraht: } G = 81500 \text{ MPa}$$

gewählt: $n = 4,5$

Gesamt Zahl der Windung:

$$\text{Kaltgeformt: } n_t = n + 2 = 6,5 \quad || d < 16 \text{ mm} \vee d \neq 8 \dots 60 \text{ mm}$$

Federrate:

$$R_{ist} = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D^3 \cdot n} = 6,17 \text{ MPa}$$

$$\text{—> } s_n = \frac{F_n}{R_{ist}} = 50,65 \text{ mm}$$

Summe der Mindestabstände zwischen den einzelnen Windungen:

- bei statischer Beanspruchung:
kaltgeformt: $S_a = [0,0015 \cdot (D^2/d) + 0,1 \cdot d] \cdot n = 4,19 \text{ mm}$
- bei dynamischer Beanspruchung:
kaltgeformt: $S_{a'} = 1,5 \cdot S_a = 6,285 \text{ mm}$

Blocklänge: $L_c \leq n_t \cdot d_{max} = 22,295 \text{ mm}$

gewählt: $L_c = 23 \text{ mm}$ || Kaltgeformt; Federenden angelegt und planbearbeitet

Kleinste zulässige Federlänge:

- bei statischer Beanspruchung:
 $L_n = L_c + S_a = 27,19 \text{ mm}$
- bei dynamischer Beanspruchung:
 $L_n = L_c + S_{a'} = 29,285 \text{ mm}$

Länge der unbelasteten Feder:

$$L_0 = s_n + S_{a'} + L_c = 79,935 \text{ mm}$$

B.1.2. Federwerkstoffe

DIN EN 10270-1, DH, nicht kugelgestrahlt

Schub-(Gleit-)modul: $G = 81500 \text{ MPa}$

Zugfestigkeit $R_m = 1726,3 \text{ MPa}$

$$\tau_{zul} = 0,5 * R_m = 863,15 \text{ MPa} \quad | \text{ Druckfeder}$$

$$\tau_{czul} = 0,56 * R_m = 966,72 \text{ MPa}$$

$$\text{Unterspannung: } \tau_{ku} = \tau_{k1} = k * \tau_1 = 497,97 \text{ MPa}$$

$$\tau_1 = \frac{F_1 * (D/2)}{(\pi/16) * d^3} = 444,62 \text{ MPa}$$

$$k = 1,12 \quad | \quad w = 10,76$$

$$\text{Oberspannung: } \tau_{ko} \approx 700 \text{ MPa}$$

B.1.3. Spannungsnachweis

- Bei statischer Beanspruchung:

$$\tau_2 = \frac{F_{max} * (D/2)}{(\pi/16) * d^3} = 741 \text{ MPa} < \tau_{zul}$$

- Bei dynamischer Beanspruchung:

$$\tau_c = \frac{F_c * (D/2)}{(\pi/16) * d^3} = 833,01 \text{ MPa} < \tau_{czul}$$

$$F_c = R_{ist} * (L_0 - L_c) = 351,29 \text{ MPa}$$

B.2. Auslegung Dämpfer

Quelle: [3]

Da die exakten Kräfte nur durch aufwändige Messreihen ermittelt werden können, wird zur Auslegung eine überschlägige Berechnung verwendet. Aus der Berechnung der Feder geht hervor, dass bei einer dynamischen Belastung die Federkraft bei etwa $F_n = 300N$ liegt. Dem entgegen wirkt die Gewichtskraft $F_g = 245N$. Hier aus ergibt sich die mittlere Dämpferbelastung.

B.2.1. Kräfte

mittlere Dämpferbelastung:

$$F_m = 0.8 * F_n - F_g = 55N$$

Die Dämpferkraft wird in eine Druck- und eine Zugkraft aufgeteilt. Mit dem gewählten $q = 10$ (Kräfteverhältnis bei Nkw 10 - 15)

Durckkraft:

$$F_e = F_m * \frac{2}{1+q} = 10N$$

Zugkraft:

$$F_a = F_m * \frac{2*q}{1+q} = 100N$$

B.3. Bolzenverbindung

Quellen: [2], [1]

Gewählt ist ein Bolzen nach *DIN EN 22340 ISO 2340 Form A* aus *Automatenstahl "X8CrNiS18-9" ISO 2340-A-6h11x18*[H.1]. Der Bolzen wird nach dem Einbaufall 2 montiert. Dem entsprechend ein Sitz in der Gabel mit eine *Übermaßpassung* und ein Sitz in der Stange mit *Spielpassung*.

B.3.1. Vorhandene Belastung:

Dimensionen:

Dicke des Stangenlauges: $t_S = 5,5 \text{ mm}$

Dicke des Gabellauges: $t_G = 4,25 \text{ mm}$

Länge des Bolzens: $l_1 = 18 \text{ mm}$

Durchmesser des Bolzens: $d_1 = 6 \text{ mm}$

Belastung:

$$F_{max} = 75 \text{ N}$$

|| Maximale Kraft des Stoßdämpfers

$$\rightarrow M_{bmax} = \frac{F_{max} * t_S}{8} = 51,56 \text{ Nmm}$$

|| Einbaufall 2

Anwendungsfaktor: $K_a = 1,4$

|| Gewählt nach TB.3-4c

B.3.2. Biegespannung im Bolzen

Zulässige Biegespannung:

Zugfestigkeit: $R_m = 500 \text{ MPa}$

|| X8CrNiS18-9

$$\sigma_{bzul} = R_m * 0,15 = 75 \text{ MPa}$$

|| wechselnde Belastung

Vorhandene Biegespannung:

$$\sigma_b \approx \frac{K_a * F_{max}}{0,1 * d_1^3} = 4,86 \text{ MPa} \leq \sigma_{bzul}$$

B.3.3. Flächenpressung am Bolzen:

Zulässige Flächenpressung:

$$p_{zul,B} = 0,25 * R_m = 125 \text{ MPa}$$

|| $R_m = 500 \text{ MPa}$

$$p_{zul,G} = 0,25 * R_{m,Al} = 50 \text{ MPa}$$

|| $R_m = 250 \text{ MPa}$; ENAW-AlMg2Mn0,8(H18)

$$p_{zul,S} = 0,25 * R_m = 72,5 \text{ MPa}$$

|| $R_m = 290 \text{ MPa}$; S185

Vorhandene Flächenpressung:

$t_S \leq 2 * t_G \rightarrow$ die größte Flächenpressung tritt zwischen dem Bolzen und der Stangenlauge ein.

Projektionsfläche zwischen dem Bolzen und der Stangenlauge: $A_{proj,B/S} = d_1 * t_S = 33 \text{ mm}^2$

$$\rightarrow p_{B/S} = \frac{F_{max} * K_a}{A_{proj,B/S}} = 3,18 \text{ MPa} \leq p_{zul,G} \leq p_{zul,B}$$

B.3.4. Normalspannung im Wangenquerschnitt des Stangenkopfes

Abmessung des Stangenkopfes

Werkstoff: S185 Lochdurchmesser: $d_0 = 6,1 \text{ mm}$

Wangenbreite: $c = 1,95 \text{ mm}$ Stangendicke: $t = 6 \text{ mm}$

Zulässige Spannung:

$$R_e = 185 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{zul} = 0,2 * R_e = 37 \text{ MPa}$$

Vorhandene Spannung:

$$\sigma = \frac{K_a * F_{max}}{2 * c * t} * \left[1 + \frac{3}{2} * \left(\frac{d_0}{c} + 1 \right) \right] = 33,73 \text{ MPa} \leq \sigma_{zul}$$

C. Auslegung Linearführung

Aufgrund der Maße der Feder wurde folgendes Linearkugellager gewählt: LMUF30G

Eigenschaften:

- Dynamische Tragzahl: $C = 1570N$
- Statische Tragzahl: $C_0 = 2740N$
- Außen Durchmesser: $D = 45mm$
- Innen Durchmesser: $dr = 30mm$
- Flanken-Durchmesser Kugel: $dm = dr * 1,15 = 34.5mm$
- Länge: $L = 64mm$
- Verfahrweg: $S = 30mm$
- Hin- und Herbewegungen: $n_1 = 60 \frac{1}{min}$
- Härtekoeffizient: $f_H = 0,55$
- Temperaturkoeffizient: $f_T = 1$
- Kontaktkoeffizient: $f_C = 1$
- Lastkoeffizient: $f_W = 1,25$
- Radialfaktor: $X = 2$ (keine Daten gefunden. Als Sicherheit 2 gewählt)

C.1. Belastung

- Maximale auftretendes Moment beim Lenken: $M_L = 8,5Nm$
- Hebelarm: $h = 97mm$

Radialkraft

$$F_r = \frac{M_L}{h} = 87,63N$$

Äquivalente Belastung

$$P = X * F_r = 175,26N$$

C.2. Lebensdauer

Nenn-Lebensdauer

$$L = \left(\frac{f_H * f_T * f_C}{f_W} * \frac{C}{P} \right)^3 * 50 = 61,236km$$

Lebensdauer

$$L_h = \frac{10^6 * L}{600 * S * \left(\frac{n_1}{\pi * d_m} \right)} = 6145,43h$$

D. Auslegung Lenkungsmotoren

Quellen: [2], [1]

Der Lenkungsmotor soll dafür sorgen, die Masse der einzelnen Aufhängung in eine schrittkontrollierte Weise zu drehen. Dabei ist auch die Reibung an den Rädern maßgebend. Deshalb unterteilt sich das gesuchte Drehmoment in Lastdrehmoment aus der Reibung und ein Beschleunigungsdrehmoment für die zu bewegende Masse.

D.1. Lastdrehmoment

$$T_l = F_R * b_r = 5,6Nm \quad || \text{ Radbreite: } b_r = 0,114m$$

D.2. Beschleunigungsdrehmoment

D.2.1. Reduziertes Trägheitsmoment

Trägheitsmoment des Rades:

$$J_r = 0kgm^2 \quad || \text{ Nullabstand zur Drehachse}$$

Trägheitsmoment des Profils:

$$\text{Dichte von Aluminium: } \rho_{Alu} = 0,0027kg/cm^3$$

$$\text{Dichte von Aluminium: } \rho_{St} = 0,00785kg/cm^3$$

- Querbalken:

Material: Stahl

Länge: $l_{Qb} = 22,5cm$

Breite: $b_{Qb} = 3,5cm$

Höhe: $h_{Qb} = 1,5cm$

Volumen: $V_{Qb} = l_{Qb} * b_{Qb} * h_{Qb} = 118,125cm^3$

Masse: $m_{Qb} = V_{Qb} * \rho_{Stahl} = 0,93Kg$

- Führungszylinder:

Material: Aluminium

Außendurchmesser: $D_{aFz} = 5,5cm$

Innendurchmesser: $D_{iFz} = 4,2cm$

Höhe: $h_{Fz} = 22,5cm$

Volumen: $V_{Fz} = \pi * r_{Fz}^2 * h_{Fz} = 222,84cm^3$

Masse: $m_{Fz} = V_{Fz} * \rho_{Alu} = 0,6kg$

Masse des Profils:

$$J_p = \frac{m_p * (D_{aFz}^2 - D_{iFz}^2)}{8} + m_p * a_{pd}^2 = 0,015 kgm^2$$

$$m_p = m_{Fz} + m_{Qb} = 1,53kg$$

Trägheitsmoment des Dämpfungssystems:

$$J_{res} = J_d + J_p + J_r = 1,825 kgm^2$$

$$J_d = m_d * a_{dd}^2 = 1,81 kgm^2$$

Winkelbeschleunigung:

$$T_a = J_{res} * \pi = 1,91 Nm$$

$$\alpha = \pi / 3P = 1,047$$

D.3. Anlaufdrehmoment

$$T_{an} = T_a + T_l = 7,51 Nm$$

E. Auslegung Kreuzrollenlager

Quellen: [2], [1]

Aufgrund der Bauweise der Welle des Antriebsmotors und der Bauform der Gabel wurde eine Vorauswahl für das Lager getroffen. Gewählt wurde das XV40.

- Anwendungsfaktor: $K_A = 1,75$
- Masse pro Lager: $m = 50kg$
- Hebelarm: $h = 0,4625m$

- Drehzahl: $n = 250 \text{min}^{-1}$
- Reibungskoeffizient: $\mu = 0,1$
- dynamische Tragzahl, axial: $C = 13000$
- Wälzkörper-Mittendurchmesser: $D_M = 52 \text{mm}$

E.1. Belastung

Axialkraft

$$F_a = K_A * m * g = 858,375 \text{N}$$

Radialkraft

$$F_r = 0$$

Kippmoment

$$M_k = F_a * \mu * h = 39,7 \text{Nm}$$

E.2. Lebensdauer

Lastexzentrizität

$$\epsilon = \frac{2000 * M_k}{F_a * D_M} = 1,78$$

dynamische Lastfaktor

$$k_F = 3,25$$

Dynamische äquivalente Tragzahl

$$P_a = k_A * F_a = 2789,72$$

Nominelle Lebensdauer

$$L = \left(\frac{C_a}{P_a}\right)^p = 169,02 * 10^6 \text{Umdrehungen}$$

F. Befestigungsschrauben

Quellen: [2], [1]

Für die Befestigung des Fahrwerkes, mit dem Oberkasten des Roboters, sind 8 Schrauben pro Aufhängung vorgesehen. Die Schrauben werden hauptsächlich durch die Vorspannkraft sowie Betriebskraft beansprucht. Diese letzte unterteilt sich in eine Querkraft durch die Lenkung und eine Kraft in Längsrichtung der Schrauben beim Hochheben des Roboters. Beide Kräfte treten in diesem Fall statisch auf.

F.1. Entwurf

Beanspruchung:

- Querkraft: $F_Q = \frac{1}{z} * \frac{2}{D} * T_{max} = 16,22 \text{ N}$
 $D = 0,13 \text{ m}$
 $T_{max} = (8,5) \text{ Nm}$
 $z = 8 \text{ Schrauben}$
- Betriebskraft: $F_B = m_F * g = 166,77 \text{ N}$
 $m_k \approx 17 \text{ kg}$

Vorgewählt: $ISO4014 - M5 \times 25 - 8.8$

Spannkraft: $F_{sp} = 7,30 \text{ kN}$, $M_{sp} = 5,9 \text{ Nm}$ ||TB.8-13, $\mu_{ges} = 0,12$

Flächenpressung:

$$p = \frac{F_{sp} * 10^3}{0,9 * A_p} = 588,24 \text{ MPa} < p_G$$

$$A_p = 13,60 \text{ mm}^2 \quad || \text{ TB.8-8}, \quad p_G = 710 \text{ MPa} \quad || \text{ TB.8-10b; E295}$$

F.2. Montagevorspannkraft

Klemmkraft:

$$F_{kl} = \frac{F_q}{\mu_t} = 81,11 \text{ N}$$

$$\mu_t = 0,20 \quad || \text{ TB.8-12d; Stahl-Al-Leg.}$$

Nachgiebigkeit der Schraube:

$$\begin{aligned} d &= 5 \text{ mm} & A_3 &= 12,69 \text{ mm}^2 & l_1 &= 10 \text{ mm} & l_{ko} &= 2,5 \text{ mm} \\ l_{Ge} &= 2,5 \text{ mm} & l_M &= 2,00 \text{ mm} & A_N &= 19,63 \text{ mm}^2 & E_1 &= 210 * 10^3 \text{ MPa} \\ E_2 &= 70 * 10^3 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\delta_s = \frac{1}{E_1} * \left(\frac{l_{ko}}{A_N} + \frac{l_1}{A_N} + \frac{l_{Ge}}{A_3} \right) + \frac{l_M}{E_2 * A_N} = 5,42 * 10^{-6} \text{ mm/N}$$

Nachgiebigkeit der verspannten Teile:

$$d_w = 8,00 \text{ mm} \quad d_h = 5,50 \text{ mm}^2 \quad D_a = 20 \text{ mm} \quad \chi = \sqrt[3]{\frac{l_k * d_w}{D_A^2}} = 0,63$$

$$A_{ers} = \frac{\pi * (d_w^2 - d_h^2)}{4} + \frac{\pi * d_w}{8} * l_k * [(\chi + 1)^2 - 1] = 78,56 \text{ mm}^2 \quad || D_a > d_w + l_k$$

$$\delta_t = \frac{l_1}{E_1 * A_{ers}} = 6,06 * 10^{-7} \text{ mm/N}$$

Vorspannverlust durch Setzen:

$$F_z = \frac{f_z}{\delta_t + \delta_s} = 2404,28 \text{ N} \quad || \quad f_z = 2,00 * 10^{-3} \text{ mm; TB.8-10a}$$

Montagevorspannkraft:

$$F_{VM} = k_a * (F_{kl} + F_z + F_Q * (1 - \theta)) = 5287,54 \text{ N} < F_{sp}$$

$$\theta = n * \frac{\delta_t}{\delta_t + \delta_s} = 0,05 \quad || n = 0,5$$

$$k_a = 2,00 \quad || \text{Drehmomentschlüssel, } \mu_{ges} = 0,12$$

Anziehdrehmoment:

$$\mu_{ges} = 0,12 \quad d_2 = 4,48 \text{ mm} \quad \frac{d_k}{2} = 3,25 \text{ mm}$$

$$P = 0,80 \quad || \text{TB.8-1}$$

$$M_A = F_{VM} * [0,159 * P + \mu_{ges} * (0,577 * d_2 + \frac{d_k}{2})] = 4,47 \text{ Nm} < M_{sp}$$

F.3. Kontrolle der Flächenpressung unter dem Schraubenkopf

$$p = \frac{F_{sp} + \theta * F_B}{A_p} = 530,03 \text{ MPa} < p_G$$

F.4. Statischer Nachweis

$$R_p = 640 \text{ MPa} \quad d_2 = 4,48 \text{ mm} \quad d_3 = 4,02 \text{ mm}$$

$$d_0 = \frac{d_1 + d_2}{2} = 4,25 \text{ mm}$$

$$A_0 = \frac{\pi * d_0^2}{4} = 14,18 \text{ mm}^2$$

$$F_{BS} = \theta * F_B = 8,38 \text{ N}$$

$$S = \frac{0,1 * A_0 * R_p}{F_{BS}} = 108,31$$

F.5. Zwischenfazit

Das Anziehdrehmoment wird entsprechend den Empfehlungen in TB 8-14 (M5-8.8), $\mu_{ges} = 0,12$ zu $M_{sp} = 5,9 \text{ Nm}$ gewählt. Dadurch wird die Montagevorspannkraft von den mindestens erforderlichen $F_{VM} = 5287,54 \text{ N}$ auf $F_{sp} = 7,30 \text{ kN}$ erhöht. Wodurch sich die Sicherheit der Schraube gegen Losdrehen ebenfalls erhöht.

G. Datenblätter

G.1. Datenblatt-Feder

Datenblatt Druckfeder : D-313G				GUTEKUNST FEDERN		08.2024		
d	mm	Drahtdurchmesser	F _n	N	Höchstkraft der Feder	nt	St.	Anzahl der Gesamtwindungen
D	mm	Mittlerer Windungsdurchmesser	F _c	N	Theo. Federkraft bei Blocklänge	R	N/mm	Federrate
Dd	mm	Dorndurchmesser	L ₀	mm	Ungepannte Länge der Feder	S	mm	Steigung der Federn
De	mm	Äußerer Windungsdurchmesser	L ₁	mm	Länge der Feder vorgespannt	s ₁	mm	Strecke der Feder vorgespannt
Dh	mm	Hülsemdurchmesser	L ₂	mm	Länge der Feder gespannt	s ₂	mm	Strecke der Feder gespannt
e1	mm	Abweichung von Mantellinie	L _k	mm	Knicklänge	sh	mm	Arbeitsweg (Hub)
e2	mm	Abweichung von Parallelität	L _n	mm	Kleinste Länge der Feder	sn	mm	Grösste Strecke der Feder
F ₁	N	Kraft der Feder vorgespannt	L _c	mm	Blocklänge	sn	mm	Gewicht der einzelnen Feder
F ₂	N	Kraft der Feder gespannt	n	St.	Anzahl federnden Windungen	Gewicht	g	
						F _{ndyn}	N	Dynamische Höchstkraft
						F _{ndtol}	N	(+/-) Toleranz dynamische Höchstkraft
						L _{ndyn}	mm	Kleinste Länge dynamische Belastung
						sh _{dyn}	mm	Größter Federweg dynamische Belastung

* Die Werte unter dynamischer Belastung sind nur mit einer durch Kugelstrahlen verfestigten Oberfläche erreichbar !

Form 1: Federenden angelegt und geschliffen

Form 2: Federenden angelegt

Federprüfung nach DIN ISO 2859/1 Prüfniveau II

1 Windungsrichtung <input type="checkbox"/> links <input checked="" type="checkbox"/> rechts		7 Führung und Lagerung DIN EN 13906-1 <input type="checkbox"/> Dorn <input type="checkbox"/> Hülse Knicklänge L_k bei Lagerungsbeiwert v=0,5 / Bild 5 <input type="text" value="0,00"/> mm		12 Toleranzen nach DIN EN 15800 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Gütegrad</th> <th>De, Di, D</th> <th>L0</th> <th>F1, F2</th> <th>e1, e2</th> <th>Drahtstärke d nach DIN 2076</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> </tr> </tbody> </table>		Gütegrad	De, Di, D	L0	F1, F2	e1, e2	Drahtstärke d nach DIN 2076	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Gütegrad	De, Di, D	L0	F1, F2	e1, e2	Drahtstärke d nach DIN 2076																								
1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																								
2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																								
3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>																								
2 Dynamische Beanspruchung * F _{ndyn} 375,89 F _{ndtol} 20,87 L _{ndyn} 34,53 sh _{dyn} 23,99		8 Werkstoff EN 10270-1		13 Fertigungsausgleich durch <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>L0</th> <th>n, d</th> <th>n, De, Di</th> <th>L0, n, De, Di</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Eine Federkraft mit zugehöriger Länge</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Eine Federkraft mit zugehöriger Länge und L0</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Zwei Federkräfte mit zugehörigen Längen</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </tbody> </table>			L0	n, d	n, De, Di	L0, n, De, Di	Eine Federkraft mit zugehöriger Länge	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Eine Federkraft mit zugehöriger Länge und L0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Zwei Federkräfte mit zugehörigen Längen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
	L0	n, d	n, De, Di	L0, n, De, Di																									
Eine Federkraft mit zugehöriger Länge	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																									
Eine Federkraft mit zugehöriger Länge und L0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																									
Zwei Federkräfte mit zugehörigen Längen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																									
3 Arbeitsweg sh <input type="text"/> mm		9 Draht- oder Staboberfläche <input checked="" type="checkbox"/> gezogen <input type="checkbox"/> gewalzt <input type="checkbox"/> spanend bearbeitet		14 Federn setzen Alle Federn, die nach ihrer Baugröße zum Setzverhalten neigen, sind vorgesetzt.																									
4 Lastspielzahl N <input type="text"/>		10 Federn entgratet <input type="checkbox"/> innen <input type="checkbox"/> außen		Staffelpreise <table border="1"> <thead> <tr> <th>Mengenstaffel</th> <th>Einzelpreis [EUR]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>12,4800 €</td></tr> <tr><td>2</td><td>9,9500 €</td></tr> <tr><td>3</td><td>5,4200 €</td></tr> <tr><td>7</td><td>3,2800 €</td></tr> <tr><td>17</td><td>1,8300 €</td></tr> <tr><td>37</td><td>1,5400 €</td></tr> <tr><td>75</td><td>1,5100 €</td></tr> <tr><td>125</td><td>1,4586 €</td></tr> <tr><td>175</td><td>1,4634 €</td></tr> <tr><td>250</td><td>1,4345 €</td></tr> <tr><td>350</td><td>1,4116 €</td></tr> </tbody> </table>		Mengenstaffel	Einzelpreis [EUR]	1	12,4800 €	2	9,9500 €	3	5,4200 €	7	3,2800 €	17	1,8300 €	37	1,5400 €	75	1,5100 €	125	1,4586 €	175	1,4634 €	250	1,4345 €	350	1,4116 €
Mengenstaffel	Einzelpreis [EUR]																												
1	12,4800 €																												
2	9,9500 €																												
3	5,4200 €																												
7	3,2800 €																												
17	1,8300 €																												
37	1,5400 €																												
75	1,5100 €																												
125	1,4586 €																												
175	1,4634 €																												
250	1,4345 €																												
350	1,4116 €																												
5 Lastspielfrequenz n <input type="text"/> /		11 Oberflächenschutz <input type="checkbox"/> kugelgestrahlt																											
6 Arbeitstemperatur <input type="text"/> °C																													
Bemerkungen Ursprungsland: DE Zolltarifnummer: 73202081																													

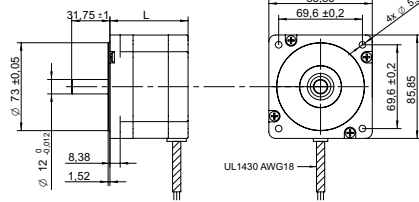
Gutekunst + Co.KG Federnfabriken · Carl-Zeiss-Straße 15 · D-72555 Metzingen
 Verkauf (+49) 07123 / 960-192 · Individuelle Federn (+49) 07123 / 960-193 · Zentrale (+49) 07123 / 960-0
 Telefax (+49) 07123 / 960-195 · E-mail: verkauf@gutekunst-co.com

G.2. Datenblatt-Lenkungsmotor

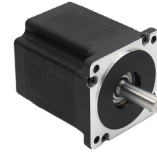
SHW86-18 | □ 86 x 86 mm | HYBRID STEPPING MOTOR



DRAWING (mm)



PHOTO



MODEL NO. DESIGNATION

SHW86 - STEP ANGLE - CURRENT

Example: SHW8665-18-280

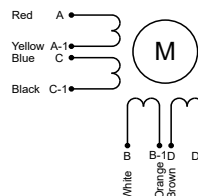
OPTIONS DRIVER AND POWER SUPPLY



● C = customizations are offered on demand even for smaller quantities. Typical customizations are indicated with a green dot at column end. Please contact us for any customization request.

COMMON MOTOR DATA		C
Step angle	°	1.8
Step angle accuracy ¹	%	± 5
Shaft material	X8CrNiS18-9 SUS303	
Bearing type	Ball bearing	
Radial play ²	mm	0.02
Axial play ²	mm	0.08
Max. radial force ³	N	220
Max. axial force	N	60
Dielectric strength ⁴	V	600
Insulation resistance ⁵	MΩ	100
Operating temperature	°C	-20 to 50
Insulation class	Class B	
IP rating	IP30	
Connection harness	UL 1430 AWG18 300 mm	
Connector	Not in standard	

EXCITATION SEQUENCE TABLE



CW	A	C	B	D
1	●		●	
2		●	●	
3				●
4	●			●
1	●		●	

● = +Polarity

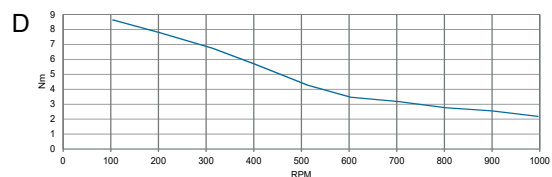
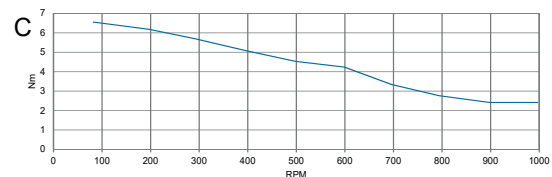
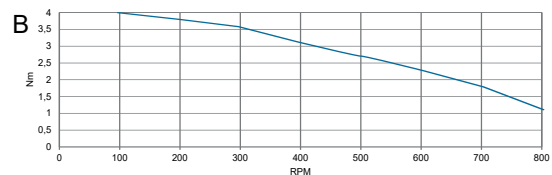
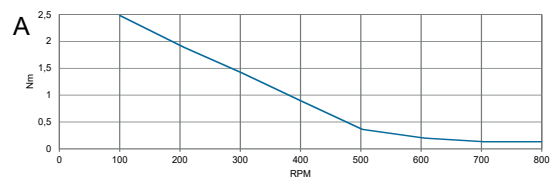
SPEED | TORQUE PERFORMANCE GRAPH PULL OUT

Graph	A	B	C	D
Supply voltage	V	48	48	48
Current phase	A	5.6	5.6	5.6
Phase connection	Parallel connection			

NOTES

1. Full step no load.
2. 450 g load.
3. 20 mm from shaft.
4. AC, 1 second.
5. 500 V, DC.

MODEL-SPECIFIC MOTOR DATA		SHW8665-18-400	SHW8680-18-600	SHW86118-18-600	SHW86156-18-600
Model		A	B	C	D
Graph		A	B	C	D
Holding torque	Nm	3.5	4.5	8.5	12
Detent torque	Nm	0.08	0.12	0.24	0.36
Rotor inertia	gcm ²	1000	1400	2700	4000
Current phase	A	4	6	6	0.63
Resistance phase	Ω	0.65	0.33	0.5	8
Inductance	mH	3.9	3	6	12
Length	mm	65	80	118	156
Weight	kg	1.7	2.3	3.8	5.3



G.3. Datenblatt-Stoßdämpfer

STAB-O-SHOC®

STAB-O-SHOC HD15

Dampers for low damping forces
The standard STAB-O-SHOC HD15 is a non-pressurized damper. It is orientation-specific and achieves its optimum function in almost vertical

installation with force transmission without a no-load stroke in one direction of movement. Special variants with horizontal function are also possible, as are

models providing force support during extension or path-dependent damping.

Dämpfer für niedrige Dämpfungskräfte
Der Standard STAB-O-SHOC HD15 ist ein druckloser Dämpfer. Er ist lageabhängig, seine optimale

Funktion erreicht er bei nahezu vertikalem Einbau mit leerhubfreier Kraftübertragung in einer Bewegungsrichtung.

Waagerecht arbeitende Sonderformen sind ebenso möglich wie Kraftunterstützung beim Ausschub oder auch wegabhängige Dämpfung.

Technical drawing of the STAB-O-SHOC HD15 damper. The main drawing shows a horizontal damper with dimensions: total length 180 mm, mounting eye diameter Ø15, and mounting eye width 18 mm. The damper is labeled 'STAB-O-SHOC HD15'. Below the main drawing are five mounting options (K1 to K5) with their respective dimensions. K1: Thickness 10 mm, eye diameter Ø15, eye width 18 mm. K2: Thickness 5 mm, eye diameter Ø10, eye width 18 mm. K3: Width 12 mm, mounting eye diameter Ø6, mounting eye width 12 mm. K4: Mounting eye diameter Ø10, mounting eye width 18 mm. K5: Mounting eye diameter Ø10, mounting eye width 18 mm, mounting eye height 24.3 mm, mounting eye width 13 mm, mounting eye thread M8.

1) A		2) A*		B	
Stroke Hub	Stroke Hub	Extended length Ausgesch. Länge	3) 4) F _z [N]	3) 5) F _D [N]	Ref.-No. Bestell-Nr.
30	30	110	75	< 25	4165ZQ
			300	< 25	4166ZL
			800	< 25	4167ZG
30	60	157	< 25	125	4168ZB
			< 25	250	4169ZX
			< 25	550	4171ZD
60	60	175,5	75	< 25	4172ZZ
			300	< 25	4173ZU
			800	< 25	4174ZP
60	105	247	< 25	125	4175ZK
			< 25	250	4176ZF
			< 25	550	4177ZA
100	100	258,5	75	< 25	4179ZR
			300	< 25	4181ZY
			800	< 25	4182ZT
100	160	357	< 25	125	4183ZO
			< 25	250	4184ZJ
			< 25	550	4187ZV

1) Hydraulic stroke (damped) / Hydraulischer Hub
2) Mechanical stroke / Mechanischer Hub
3) Linear test speed 100 mm/s
Prüfgeschwindigkeit linear: 100 mm/s

4) Mounting: piston rod down, piston flow only in oil = hydraulic stroke, A
Einbauanlage: Kolbenstange nach unten, ausschließlich Kolbenbewegung im Öl = hydraulischer Hub, A

5) Mounting: piston rod up, maximum possible stroke in oil and air chamber = mechanical stroke, A*
Einbauanlage: Kolbenstange nach oben, maximale Kolbenbewegung durch Ausgleichsraum und Öl = mechanischer Hub, A*

Ordering example / Bestell-Beispiel		
123456	/	K2
Ref.-No. Bestell-Nr.	Piston rod end fitting Kolbenstangen-Anschluss	Pressure tube end fitting Druckrohr-Anschluss

F_z Blocking force in traction direction [N]
Blockierkraft in Zugrichtung [N]

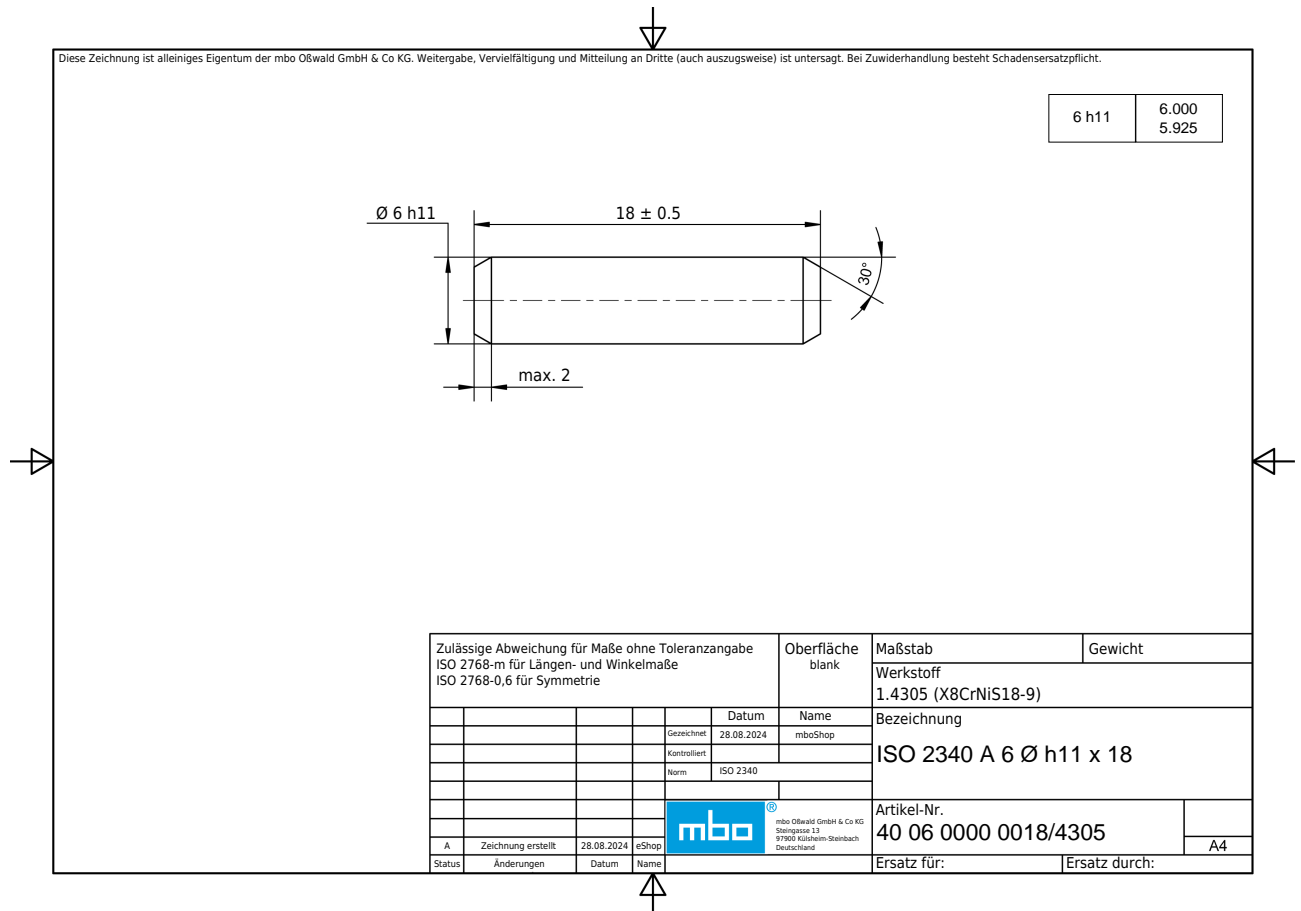
F_D Blocking force in compression direction [N]
Blockierkraft in Druckrichtung [N]

Installation according to STAB-Spec. 10145882
Montage nach STAB-Spec. 10145882

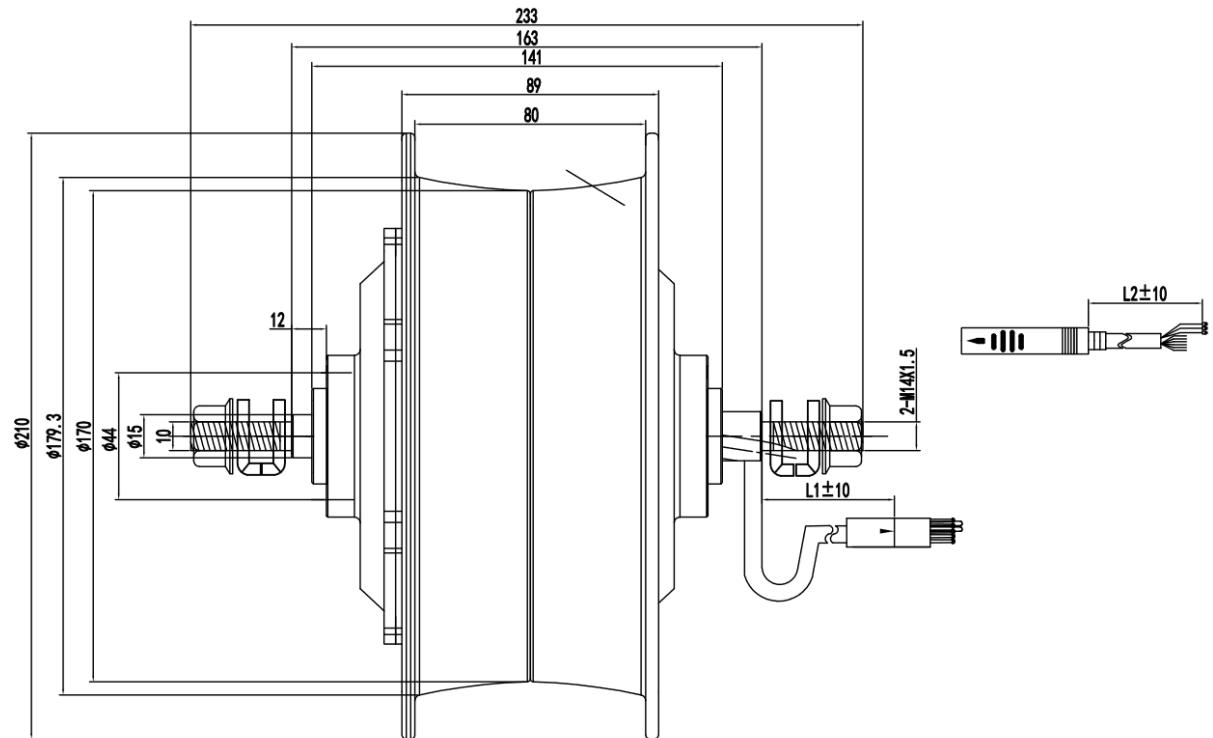
We reserve the right to make modifications. Dimensions in mm.
Änderungen vorbehalten. Maßangaben in mm.

H. 2D-Zeichnung

H.1. Bolzen



H.2. Antriebsmotor



Literatur

- [1] SPURA CHRISTIAN ; FLEISCHER BERNHARD ; WITTEL HERBERT ; JANNASCH DIETER. „Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung“. 26. Aufl. Wießbaden: Springer, (2023).
- [2] SPURA CHRISTIAN ; WITTEL HERBERT ; JANNASCH DIETER. „Roloff/Matek Maschinenelemente Formelsammlung“. 26. Aufl. Wießbaden: Springer, (2023).
- [3] STEFAN GIES METIN ERSOY. „Fahrwerkhandbuch: Grundlagen – Fahrdynamik – Fahrverhalten– Komponenten – Elektronische Systeme – Fahrerassistenz – Autonomes Fahren– Perspektiven“. 5. Aufl. Wießbaden: Springer, (2017).
- [4] SKARL THEODOR RENIUS. „Fundamentals of Tractor Design“. 1. Aufl. Wießbaden: Springer, (2020).