

Universität Kassel
Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften
B.Sc. Ökologische Landwirtschaft

Projektarbeit

zum Thema

Konstruktion und Bau einer kleinskaligen Center Pivot Beregnungsanlage

1. Prüfer: Dr. Hubertus Siebald (Dipl.-Phys.)
Fachgebiet: Agrartechnik
2. Prüfer: Dr. Anke Hupe
Fachgebiet: Ökologischer Land- und Pflanzenbau

vorgelegt von

Matthias Danner (35331010)

Witzenhausen, Dezember 2020

Inhaltsverzeichnis

I.	Abbildungsverzeichnis.....	II
II.	Tabellenverzeichnis.....	II
III.	Einheitenverzeichnis.....	III
1	Einleitung	1
1.1	Forschungsstand.....	1
1.2	Problemstellung	2
2	Konstruktion und Aufbau der Anlage	3
2.1	Fahrgestell	3
2.2	Ausleger.....	6
2.3	Drehpunkt	7
2.4	Montage.....	8
3	Auslegung Antriebsleistung	12
4	Bewertung des Prototyps	15
5	Optimierungsmöglichkeiten	17
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	21
	Literaturverzeichnis	22
	Anhang A	23
	Anhang B	24
	Anhang C	25
	Eigenständigkeitserklärung	26

I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lagerung der Autoreifen	3
Abbildung 2: Kraftübertragung Achse/Reifen.....	3
Abbildung 3: Kraftschluss Achse	4
Abbildung 4: Ausrichtung der Radachsen.....	4
Abbildung 5: Fahrgestell.....	5
Abbildung 6: Verbindung Fahrgestell mit Ausleger	6
Abbildung 7: Klemmverbindung Rohre	7
Abbildung 8: Nachspannvorrichtung	7
Abbildung 9: Ausleger	7
Abbildung 10: Drehpunkt.....	8
Abbildung 11: Lagerung Drehpunkt	8
Abbildung 12: Fixierung Fahrgestell	9
Abbildung 13: Montageungenauigkeit Querstreben	10
Abbildung 14: Montage letztes Segment	10
Abbildung 15: Ausleger montiert.....	11
Abbildung 16: Abspannen des Auslegers	17
Abbildung 17: Durchbiegung	18
Abbildung 18: Knickbelastung	18
Abbildung 19: Dreiecksträger	19
Abbildung 20: Steckverbindung	20

II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anlagengewicht	12
Tabelle 2: Zugkraftberechnung*	13
Tabelle 3: Motorleistungsbedarf	14
Tabelle 4: Vergleich Stahlprofile	19

III. Einheitenverzeichnis

d	Tag
h	Stunde
ha	Hektar
kg	Kilogramm
kN	Kilonewton
l	Liter
m	Meter
m ²	Quadratmeter
min	Minute
mm	Millimeter
N	Newton
W	Watt

1 Einleitung

Deutschland zählt zu den wasserreichen Ländern auf der Welt. Dementsprechend spielt die Bewässerung von Nutzpflanzen in Deutschland bisher nur eine untergeordnete Rolle. So wurden z.B. im Jahr 2010 lediglich 3,3%, etwa 560.000 ha, der landwirtschaftlich genutzten Fläche bewässert (Banse et al. 2018). Jedoch kann es regional und insbesondere in den Wachstumsphasen der Kulturpflanzen zu Wasserengpässen kommen, wodurch eine künstliche Beregnung unerlässlich wird (Roth-Kleyer 2016). Die Einsatzgebiete für die geplante Kreisberegnungsanlage sind kleine Ackerflächen für den Gemüsebau oder andere, in kleineren Dimensionen angebaute Nutzpflanzen. Zudem ist der Einsatz kleinskaliger Anlagen nicht auf Deutschland begrenzt, sodass auch Kleinbauern weltweit von einer preisgünstigen und technisch simplen Anlage profitieren können. Ziel dieser Arbeit ist es, eine Konstruktion für eine kleinskalige Kreisberegnungsanlage, bestehend aus einem Fahrgestell, Ausleger und Drehpunkt, zu entwerfen und zu bauen. Im Vordergrund steht dabei eine möglichst technisch einfache und damit kostengünstige Konstruktion, die aber entsprechend robust für den dauerhaften Freilandgebrauch ausgelegt ist.

1.1 Forschungsstand

Diese Arbeit knüpft an die Projektarbeit „Planung und Bau einer Kreisberegnungsanlage“ von Juli 2019 (Cordes et al. 2019) und an das Praktikum des Autors in der Agrartechnik der Universität Kassel im August und September 2019 an. Eine detaillierte Erläuterung über Beweggründe für die Neukonstruktion einer Bewässerungsanlage sind den Kapiteln 1 und 2 der genannten Projektarbeit zu entnehmen. In wenigen Worten zusammengefasst soll diese neuartige Kreisberegnungsanlage die folgenden Parameter erfüllen: Mit der kleinskaligen Center Pivot Anlage sollen die Nutzpflanzen möglichst ressourcenschonend, also wasser- und energiesparend, bewässert werden. Das beinhaltet einen niedrigen erforderlichen Wasservordruck, eine möglichst gezielte Ausbringung des Wassers bei einer autark arbeitenden Anlage, die zudem noch ohne den Einsatz von großen Maschinen aufgebaut und auf verschiedenen Schlägen genutzt werden kann. Angestrebt wird eine Kreisberegnungsanlage mit einem Radius von 40 m (0,5 ha), welche durch eine Photovoltaik (PV) – Anlage und eine Batterie angetrieben wird. Die Bewässerung soll mit einem Wasservordruck von 0,3 bar eine Beregnungsmenge von 5 mm/d realisieren.

1.2 Problemstellung

In der vorangegangenen Projektarbeit haben sich insgesamt acht Studierende aus dem Studiengang ökologische Agrarwissenschaften mit dem Bau der Bewässerungsanlage auseinandergesetzt. Dabei wurde die Anlage in die Bereiche Hydraulik (=Bewässerung), Statik (=Konstruktion) und Energie (=Antrieb und Energieversorgung) unterteilt. Das Resultat dieser Projektarbeit und auch meines Praktikums ist, dass die Statik der Anlage die größten Schwierigkeiten bereitet. Verschiedenste Berechnungsdüsen und auch Elektromotoren, sowie PV-Anlagen sind bei bekannten Leistungsanforderungen auf dem Markt erhältlich. Deutlich problematischer stellt sich die Situation für das Fahrgestell, den Ausleger und den Drehpunkt dar. Dabei handelt es sich um den Bau eines Prototypen, da es keine vergleichbaren, serienmäßigen Lösungen für diese Baugruppen gibt.

Während des Praktikums wurden diverse Berechnungsansätze für die Festigkeitsauslegung des Auslegers angewandt, welche aber ebenfalls keine verwertbaren Resultate mit sich brachten. Die einzige Erkenntnis, die gewonnen werden konnte, ist dass die Länge bei Biegeberechnungen mit der dritten Potenz eingeht (Gross et al. 2010). Eine Abschätzung nach guter fachlicher Praxis ist dadurch nicht mehr ohne weiteres möglich ist. Nach mehreren Fehlversuchen wurde deshalb ohne Berechnungsgrundlage eine mögliche Konstruktionsweise gefunden. Diese konnte aber nur in kleinerem Maßstab getestet werden. Die vorliegende Arbeit knüpft an diese Konstruktionsweise an, die nachfolgend erläutert wird. Alle Abbildungen und Tabellen sind, soweit nicht anders gekennzeichnet, durch den Autor dieser Arbeit entstanden.

An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass alle Metallbautätigkeiten wie Schleifen, Sägen, Bohren und Schweißen ohne fundiertes Vorwissen durchgeführt wurden. Zudem waren die Konstruktion und der Aufbau des Prototyps ein dynamischer Prozess, bei dem sich immer wieder Änderungen am geplanten Ablauf ergaben. Es wurden auch hauptsächlich gebrauchte Teile und Lagermaterial aus der Werkstatt der Universität verwendet. Diese Umstände spiegeln sich teilweise im Erscheinungsbild der Anlage wider aber haben keinen direkten Einfluss auf die Funktionalität.

2 Konstruktion und Aufbau der Anlage

In diesem Kapitel ist die Konstruktion der Berechnungsanlage in einzelnen Baugruppen beschrieben. Grob lässt sich die Statik der Anlage in die Baugruppen Fahrgestell, Ausleger und Drehpunkt unterteilen. Das Fahrgestell fährt im Betrieb auf einer Kreisbahn um den Drehpunkt, welcher das Fahrgestell eben auf dieser Kreisbahn hält. Der Ausleger hat somit ein fixes und ein freies Ende. Auf der Prinzipskizze in Anhang A ist der Aufbau zu sehen. Das Fahrgestell befindet sich in der Mitte des Auslegers, also bei einem Radius von 18 m. Der Ausleger setzt sich aus zweimal sechs Rundrohren á sechs Metern zusammen, was einem Radius von 36 m und einer bewässerten Fläche von rund 4000 m² entspricht. Diese Größe liegt zwar unter den geforderten 40 m Radius (= 5000 m²), jedoch können die fehlenden vier Meter eventuell durch eine Düse erreicht werden. In den folgenden drei Unterkapitel werden die Baugruppen näher erläutert. Die verwendeten Materialien sind in der Stückliste in Anhang C aufgeführt.

2.1 Fahrgestell

Das Fahrgestell besteht zum Großteil aus verschiedenen Stahlprofilen, die mit Schweißnähten oder Schrauben verbunden sind. Die Übertragung der Antriebskraft auf den Boden erfolgt durch zwei hintereinander angeordnete Räder. Diese sind über vier Stehlager quasi reibungsfrei gelagert (s. Abbildung 1). Die Stehlager sind auf einem Rechteckrahmen montiert. Der Achsdurchmesser beträgt 20 mm. Der Abstand zwischen Reifen und Rahmen ist so gewählt, dass auf jede Achse ein Ritzel zum Antrieb des Reifens geschoben werden kann (s. Abbildung 1 und Abbildung 2). Die Kraftübertragung von der Achse auf den Reifen erfolgt über ein Rohr, welches über die Achse geschoben und mit einer Schraube fixiert ist (s. Abbildung 3). Eine am Rohr angeschweißte Platte ist durch vier Schrauben kraftschlüssig mit der Felge verbunden (s. Abbildung 1 und Abbildung 2).



Abbildung 1: Lagerung der Autoreifen



Abbildung 2: Kraftübertragung Achse/Reifen



Abbildung 3: Kraftschluss Achse

Im Betrieb auf dem Feld soll das Fahrgestell auf einer Kreisbahn mit einem Radius von 36 m fahren. Dazu sind beide Radachsen mit einem Winkel von jeweils 0,8 Grad zur Mittellinie ausgerichtet (s. Abbildung 4). Laut Hersteller kann jedes Stehlager mit einem Fluchtungsfehler von 2 Grad verbaut werden. Das Einstellen des Winkels erfolgt über die Langlöcher der Stehlager und kann nachjustiert werden.

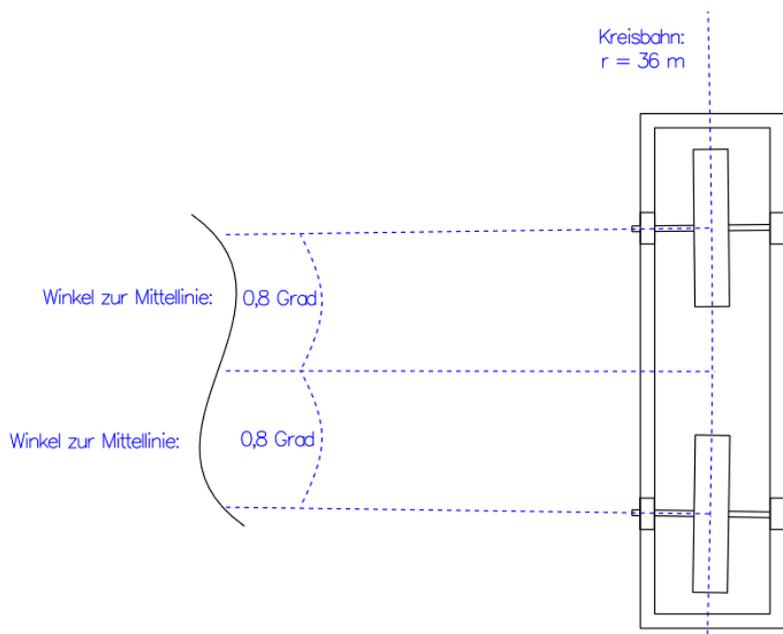


Abbildung 4: Ausrichtung der Radachsen

Die Gesamthöhe der Konstruktion ergibt aus der angestrebten maximalen Düsenhöhe und der Höhe des Aufbaus, an dem die Auslegerarme befestigt sind. Um den Bau und auch die Montage für eine Einzelperson zu ermöglichen, ist der Aufbau auf dem Fahrgestell zweigeteilt. Mit der auf den Rahmen aufgeschweißten Stahlkonstruktion erreicht der untere Teil des Fahrgestells eine Höhe von 1,4 m, wodurch eine maximale Bewässerungshöhe von ca. 1,3 m realisiert werden kann. Mit vier Schraubverbindungen kann darauf der obere Aufbau befestigt werden (s. Abbildung 5). Der obere Aufbau ist mit 2,1 m so hoch gebaut, dass der Winkel für die Stahlseile zum Abtragen des Auslegers nicht zu flach wird. Bei einem ersten Versuch mit einem niedrigeren Aufbau war dies der Fall, wodurch die Konstruktion instabil wurde. Insgesamt ergibt sich eine Gesamthöhe von 3,5 m (s. Abbildung 5). Die Aufnahme der Rundrohre des Auslegers erfolgt durch zwei Rohrstücke im unteren Bereich des Aufbaus (s. Abbildung 6). Auf die beiden Rohrstücke sind jeweils vier Muttern geschweißt, über die mittels Schraubverbindungen der Ausleger mit dem Fahrgestell verbunden wird. Am oberen Ende des Aufbaus befindet sich ein Blech mit insgesamt acht Löchern, durch die die Stahlseile und Kauschen gezogen sind. Die Abspannung des Auslegers ist in Kapitel 2.2 erläutert. Weitere Bilder zum Bau des Fahrgestells befinden sich in Anhang B.

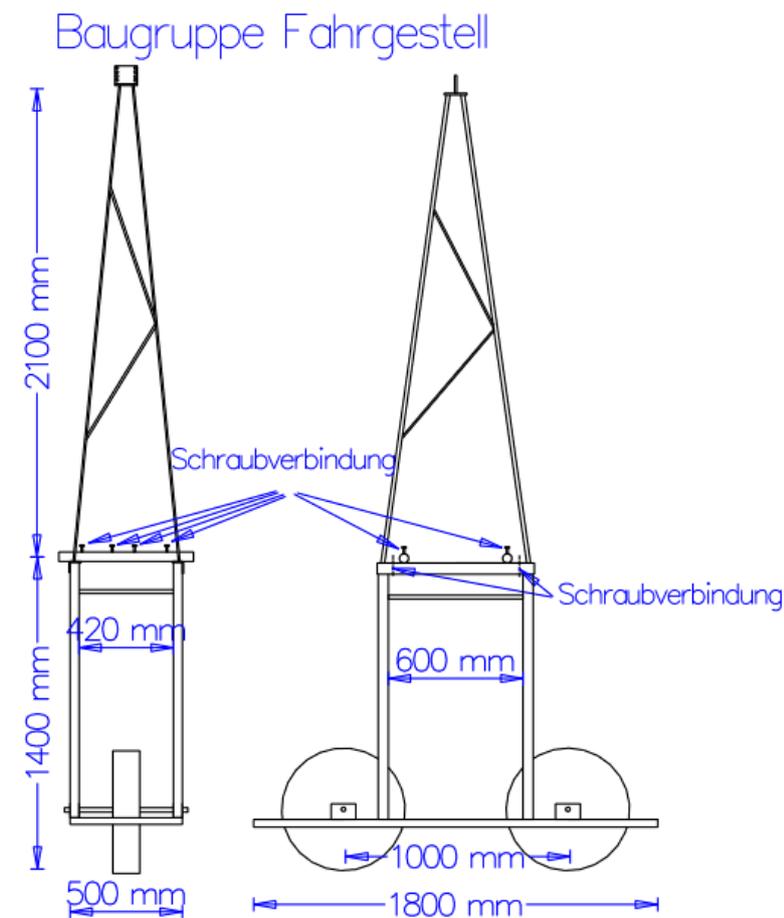


Abbildung 5: Fahrgestell



Abbildung 6: Verbindung Fahrgestell mit Ausleger

2.2 Ausleger

Die zweite Baugruppe umfasst den Ausleger. Dieser hat eine Gesamtlänge von 36 m, die durch das Fahrgestell in zwei gleichlange Arme aufgeteilt ist. In der vorangegangenen Projektarbeit hatten sich die Studenten auf eine Aufteilung der Auslegerlänge von $2/3$ zu $1/3$ festgelegt. Unabhängig von der Stabilität der Konstruktion ergibt sich daraus ein Momentenungleichgewicht, welches sich z.B. durch ein Gegengewicht am Drehpunkt oder durch eine entsprechende Verankerung des Drehpunktes im Boden ausgleichen lässt. Beide Lösungen erfüllen nicht die Vorgaben einer leichten und transportablen Ausführung der Bewässerungsanlage. Durch die nahezu ausgeglichene Bauweise wird jetzt fast die gesamte Last vom Fahrgestell aufgenommen und im Idealfall dient der Drehpunkt lediglich zur Führung auf der Kreisbahn. Im praktischen Einsatz trifft das nicht voll zu, dennoch wird der Drehpunkt weitestgehend entlastet.

Der Ausleger besteht aus parallel angeordneten Rundrohren mit den Abmessungen $\varnothing 33,7 \times 3,2$ mm. Der Abstand der Rohre zueinander beträgt 450 mm. Jedes Rohr hat eine Länge von 6 m und ist an den Enden durch eine Klemmverbindung, bestehend aus einem Rohrstück mit aufgeschweißten Muttern, mit dem nächsten Rohr verbunden (s. Abbildung 7, rostbraun). Im Abstand von ca. 4 m ist der Ausleger zum Fahrgestell mittels eines $\varnothing 6$ mm Stahlseils abgespannt (s. Abbildung 7 und Abbildung 9). Die Stahlseile sind mittig in einer Querstrebe mit einer Spannschraube befestigt (s. Abbildung 8). Im aufgebauten Zustand ist so ein Nachspannen der einzelnen Stahlseile möglich. Die Verbindung der Querstreben mit den parallel verlaufenden Rohren erfolgt durch T-Rohrverbindern mit Madenschrauben.



Abbildung 7: Klemmverbindung Rohre



Abbildung 8: Nachspannvorrichtung

Am freien Ende (rechts in Abbildung 9) des Auslegers ist das letzte Segment auf ein Rohr reduziert, da hier lediglich die Wasserleitung und die Düsen abgehängt werden müssen. Die Zusammenführung des Auslegers mit dem Drehpunkt ist im folgenden Kapitel 2.3 beschrieben.

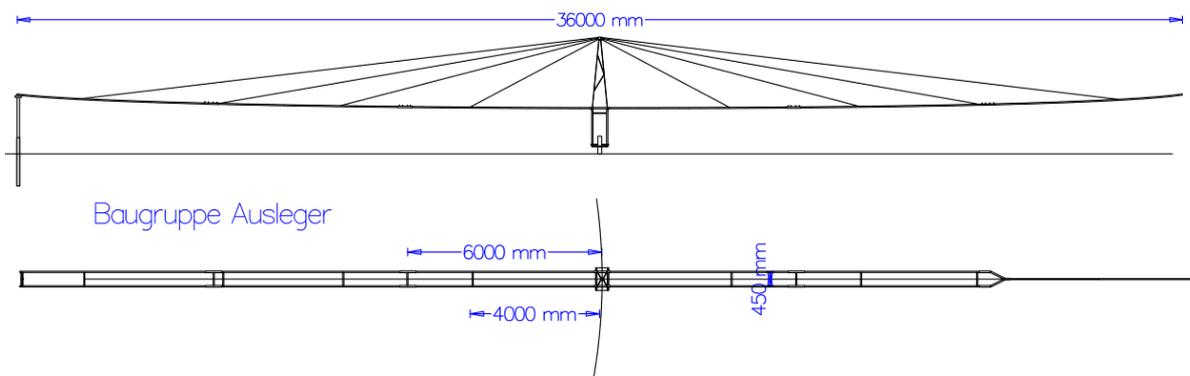


Abbildung 9: Ausleger

2.3 Drehpunkt

Der Drehpunkt stellt den Fixpunkt der Berechnungsanlage dar. Dieser soll das Fahrgestell auf der vorgesehenen Kreisbahn halten. Zudem ist dort der Anschluss für die Bewässerungszuleitung vorgesehen.

Der Drehpunkt besteht zum jetzigen Zeitpunkt aus einem senkrecht stehendem Stahlrohr \varnothing 80 mm, welches ca. 1 m tief im Boden steckt (s. Abbildung 10). Am oberen Ende ist ein Flanschlager montiert, auf dem der Ausleger aufliegt und mittels U-Schellen verschraubt ist (s.

Abbildung 11). Dieses Gelenkt ermöglicht eine reibungsarme Kreisbewegung (radial) und kann zudem Höhenunterschiede auf dem Feld in axialer (also vertikaler) Richtung ausgleichen. Zu beachten ist, dass das Flanschlager keine hohen Axialkräfte aufnehmen kann. Deshalb ist es wichtig, dass sich der Ausleger möglichst im Gleichgewicht befindet.



Abbildung 10: Drehpunkt



Abbildung 11: Lagerung Drehpunkt

2.4 Montage

Dieser Abschnitt gibt eine stichpunktartige Montageanleitung. Der Aufbau dauert mit zwei Personen ca. 2 h. Die Bauweise der Anlage erlaubt eine einfache Montage mit folgenden Hilfsmitteln:

- 1-2 Personen
- SW 10, 13, 17
- Inbusschlüssel
- Steckschlüssel-Satz
- Holzböcke mit einer Höhe von ca. 1,6 m
- Spanngurt

In Stichpunkten erläutert kann die Anlage wie folgt aufgebaut werden:

- Im ersten Schritt sind die Stahlseile am Aufbau mit Kauschen und Seilklemmen zu befestigen. Der Aufbau ist dabei auf dem Fahrgestell montiert.
- Für die Montage der beiden Auslegerarme muss das Fahrgestell aufrecht fixiert werden. Dies kann durch zwei Pfosten und einen Spanngurt geschehen (s. Abbildung 12).
- Im Anschluss werden abwechselnd auf beiden Seiten die 6 m langen Rohre montiert. Die Holzböcke helfen dabei das auftretende Ungleichgewicht auszugleichen. Großes Augenmerk ist auf das Platzieren der Querstreben zu legen. Die hohe Spannung auf den Seilen führt leicht zum Verzug des gesamten Auslegers (s. Abbildung 13). Deshalb ist die Flucht beider Auslegerarme nach jeder Montage eines 6 m Elementes zu überprüfen. Für diesen iterativen Prozess haben sich die T-Rohrverbinder, mit welchen die Querstreben mit den Rohren verbunden sind, bewährt, da deren Lage einfach veränderbar ist.
- Die Auslegerseite am freien Ende sollte zuerst in seiner vollen Länge aufgebaut sein, bevor das letzte Segment den Ausleger mit dem Drehpunkt verbindet.
- Das letzte Segment wird zuerst durch die T-Rohrverbinder auf dem Flanschlager geschoben, ohne die Madenschrauben anzuziehen (s. Abbildung 14). Dann können die Rohre mit dem Ausleger verbunden und mit dem letzten Stahlseil abgespannt werden (s. Abbildung 15 und Abbildung 16).
- Im letzten Schritt können der Spanngurt und die Pfosten zum Fixieren des Fahrgestells entfernt werden.



Abbildung 12: Fixierung Fahrgestell



Abbildung 13: Montageungenaugigkeit Querstreben



Abbildung 14: Montage letztes Segment



Abbildung 15: Ausleger montiert I



Abbildung 16: Ausleger montiert II

3 Auslegung Antriebsleistung

Im Vorfeld der Bauphase wurde eine Auslegung der benötigte Antriebsleistung vorgenommen. Die Berechnungen erheben nicht den Anspruch die Antriebsleistung exakt festzulegen. Zum einen liegen nicht alle Informationen vor, bzw. es wurden Annahmen getroffen. Zum anderen gelten die genutzten Formeln für Automobile, die hinsichtlich Reibung und Fertigungstoleranzen optimal ausgelegt und gebaut sind. Im Folgenden werden zwei Extremfälle (Min und Max) behandelt, um die Größenordnung der benötigten Kraft besser abschätzen zu können.

Im ersten Schritt muss das Gewicht der Anlage ermittelt werden, welches sich wie folgt zusammensetzt:

Tabelle 1: Anlagengewicht

	Gewicht pro Meter / Stück [kg/m; kg/Stk.]	Länge / Anzahl [m] / [Stk]	Gewicht [kg]
Rohr Ø33,7x3,2	2,41	66	159,06
Rohrverbinder	1	7	7
Stahlseil	0,15	70	10,5
Aufhängung Mitte	15	1	15
Fahrgestell	20	1	20
Wasserleitung Ø32	0,8	36	28,8
Düsen / Leitung	0,3	32	9,6
Gesamtgewicht G			~ 250 kg

Die Zugkraft Z setzt sich aus den folgenden Komponenten (Mitschke und Wallentowitz 2014; Gross et al. 2010) zusammen:

- Rollwiderstand F_R
- Luftwiderstand F_L
- Steigungswiderstand F_{St}
- Beschleunigungswiderstand F_B

Sowohl Luftwiderstad als auch Beschleunigungswiderstand finden sich in der Berechnung nicht wieder. Zum einen können sie nicht berechnet werden und zum anderen wird deren Einfluss aufgrund der niedrigen Geschwindigkeiten als vernachlässigbar eingeschätzt.

Daraus ergibt sich folgende Formel: $Z = F_R + F_{St}$. Die zwei Fälle Min und Max bilden die optimalen (Min) und die ungünstigsten (Max) Anwendungsbedingungen ab. Der Min-Fall findet

auf einem ebenen und guten Erdweg statt (s. Tabelle 2). Im ungünstigen Max-Fall beträgt die Steigung 15% und der Rollreibungswiderstand entspricht mit $\mu = 0,35$ einer Fahrt auf einem aufgeweichten Boden.

Tabelle 2: Zugkraftberechnung*

	Min	Max
Anlagengewichtskraft	250 kg $G = 2500 \text{ N}^{**}$	250 kg $G = 2500 \text{ N}^{**}$
Steigungswiderstand F_{St}	$F_{St} = G * p$	
Steigung p	0%	15%
	$F_{St,min} = 0$	$F_{St,max} = 375 \text{ N}$
Rollwiderstand F_R	$F_R = G * \mu$	
Rollwiderstandskoeffizient μ	0,05 (→ guter Erdweg)	0,35 (aufgeweichte Böden, Sand, Lehm)
	$F_{R,min} = 2500 * 0,05 = 125 \text{ N}$	$F_{R,max} = 2500 * 0,35 = 875 \text{ N}$
Zugkraft Z	$Z_{min} = F_{St,min} + F_{R,min} = 125 \text{ N}$	$Z_{max} = F_{St,max} + F_{R,max} = 1250 \text{ N}$

*: Gleichungen und Zahlenwerte entstammen folgenden Quellen: Mitschke und Wallentowitz 2014; Gross et al. 2010

** : Die Erdbeschleunigung g ist auf 10 m/s^2 gerundet.

Die benötigte Zugkraft für die Beregnungsanlage liegt also im Bereich um 1250 N.

Nach dem Aufbau der Anlage werden zwei Zugversuche mit einem Kraftmessgerät durchgeführt. Ziel ist es, die benötigte Zugkraft zu ermitteln, um die Anlage in Gang zu bringen. Auch an dieser Stelle sind die Zahlenwerte nicht belastbar, da es nur zwei Messungen ohne Wiederholung sind. Dennoch passen die Messwerte ins Bild. Im ersten Versuch wird die Anlage auf einer unebenen Rasenfläche gezogen. Der höchste abgelesene Wert der Zugkraft beträgt ca. 250 Newton (N). Im zweiten Versuch beträgt die gemessene Zugkraft ca. 100 N, um die Anlage auf einer Holzbohle zu bewegen. Die beiden Werte liegen im Rahmen der Rechenwerte.

Die folgende Berechnung legt beispielhaft den Leistungsbedarf für einen Elektromotor unter den Bedingungen des vorher beschriebenen Max-Falls fest.

Tabelle 3: Motorleistungsbedarf

Annahmen	
Umdrehungen pro Minute f	$f = 5 \text{ U/min} = 0,0833 \text{ U/s}$
Zahnrad Durchmesser Motor	$\varnothing_{\text{Motor}} 24 \text{ mm}$
Zahnrad Durchmesser Achse	$\varnothing_{\text{Achse}} 197,7 \text{ mm}$
Reifenradius r	275 mm
Antriebsmoment Reifen	$M_{\text{max, Rad}} = F_{\text{max}} \cdot r$ $M_{\text{max, Rad}} = 1250 \text{ N} \cdot 0,275 \text{ m} = 343,75 \text{ Nm}$
Leistung $P_{\text{max, Rad}}$	$P_{\text{max, Rad}} = M_{\text{max, Rad}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f$ $P_{\text{max, Rad}} = 343,75 \text{ Nm} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,0833 \text{ 1/s}$ $P_{\text{max, Rad}} = 179,99 \text{ W}$
Leistung $P_{\text{max, Motor}}$	$P_{\text{max, Motor}} = P_{\text{max, Rad}} \cdot i$
Übersetzungsverhältnis i	$i = \varnothing_{\text{Motor}} / \varnothing_{\text{Achse}}$ $i = 24 \text{ mm} / 197,7 \text{ mm} = 0,1214$
	$P_{\text{max, Motor}} = 179,99 \text{ W} \cdot 0,1214$ $P_{\text{max, Motor}} = 21,85 \text{ W}$

Unter den beschriebenen Voraussetzungen benötigt der Motor rechnerisch eine Leistung von knapp 22 W. Aufgrund einiger Annahmen und diverser Reibungsverluste sollte ein Motor mit mehr als 100 W Leistung verbaut werden.

4 Bewertung des Prototyps

Dieses Kapitel analysiert die vorliegende Konstruktion der Berechnungsanlage auf ihre Funktionstauglichkeit und zeigt deren Stärken und Schwachstellen auf. Die Bewertung wird tabellarisch in der Reihenfolge des zweiten Kapitels durchgeführt.

Tabelle 4: Analyse Prototyp

	Stärken	Schwachstellen
Fahrgestell	<ul style="list-style-type: none"> • Voll funktionstauglich • Stehlager laufen fast reibungsfrei • Einstellen der Kreisbahn über die Langlöcher der Stehlager • Nutzen von Standardmaterial • Einfache, robuste Stahlkonstruktion • Zweiteilung des Fahrgestells ermöglicht einfachen Aufbau • Bauraum für Motoren, Batterie und PV-Panel ist vorhanden 	<ul style="list-style-type: none"> • Kraftübertragung Achse auf Reifen hat zu viel Spiel, eine Nut-Feder Verbindung wäre besser • Aufbau sollte durch weitere Raumdiagonalen verstrebt werden
Ausleger	<ul style="list-style-type: none"> • Arme befinden sich mehr oder weniger im Momentengleichgewicht • Einfacher Aufbau durch Klemmverbindungen und leichte Einzelteile • Verwendung von Standardmaterial • Nachspannen der Stahlseile über das Gewinde der Spannschrauben 	<ul style="list-style-type: none"> • Zu viel Spiel in den T-Rohrschellen → Anfällig für Torsion • Ausrichten der Querstreben, sodass der Ausleger gerade ist schwierig • Keine ausreichende Steifigkeit → es ist fraglich, ob der Ausleger das Fahrgestell auf der Kreisbahn halten kann • Trotz dicker Wandstärke haben die Rohre ein geringes Flächenträgheitsmoment
Drehpunkt	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr einfache Bauweise • Auf- und Abbau zum Versetzen der Anlage ist simpel • Neben der Radiallagerung kann das Gelenk auch Bewegungen in vertikaler Richtung ausgleichen 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Aufnahme von großen vertikalen Kräften durch das Flanschlager

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass auf den ersten Blick ein funktionstüchtiger Prototyp entstanden ist. Um diesen abschließend zu bewerten müssen mehrere Praxistests unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt werden. Es lässt sich jedoch schon jetzt feststellen,

dass der Ausleger sehr wahrscheinlich nicht die ausreichende Steifigkeit besitzt, um bei vielen Umdrehungen das Fahrgestell auf derselben Kreisbahn zu halten. Die Stahlseile können Kräfte nur in eine Richtung aufnehmen und tragen weniger stark als erhofft zur Stabilisierung des Auslegers bei. Sollte dieses Projekt fortgeführt werden, muss an erster Stelle der Ausleger überarbeitet werden.

5 Optimierungsmöglichkeiten

Dieses Kapitel listet Lösungsansätze für die genannten Schwachstellen auf und gibt weitere Hinweise und Vorschläge für das Fortführen der Arbeit:

- Für die Kraftübertragung von der Achse auf die Räder sollten Profile mit einem geringeren Spiel zueinander gewählt werden und der Kraftschluss sollte entweder über zwei Schrauben oder eine Nut-Feder Verbindung geschehen.
- Der Aufbau sollte durch weitere Raundiagonalen verstrebt werden. Zudem muss der Aufbau eventuell an den neukonzipierten Ausleger angepasst werden.
- Für den Ausleger schlägt der Autor zwei mögliche Wege vor:
 - Der Ausleger wird beibehalten und durch weitere Stahlseile abgespannt. Eine Möglichkeit dazu ist in Abbildung 17 dargestellt. Die Stahlseile (rot) laufen von den Enden des Fahrgestells diagonal zu den Auslegerarmen. Das Fahrgestell ist bereits mit den Verlängerungen ausgestattet. Ziel ist es das Fahrgestell mit dem Ausleger so zu verbinden, dass das Fahrgestell nicht von der Fahrbahn abweicht. Fraglich ist jedoch, ob dies tatsächlich gelingt. Stahlseile längen sich bei Zugbelastung und auch bei Temperaturschwankungen. Zudem ist es schwierig alle Stahlseile gleichermaßen zu spannen, sodass keine Seite zu stark bzw. schwach unter Spannung steht. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Stahlseile zum Teil relativ flach über dem Boden verlaufen und so die angebaute Kultur beschädigen können.

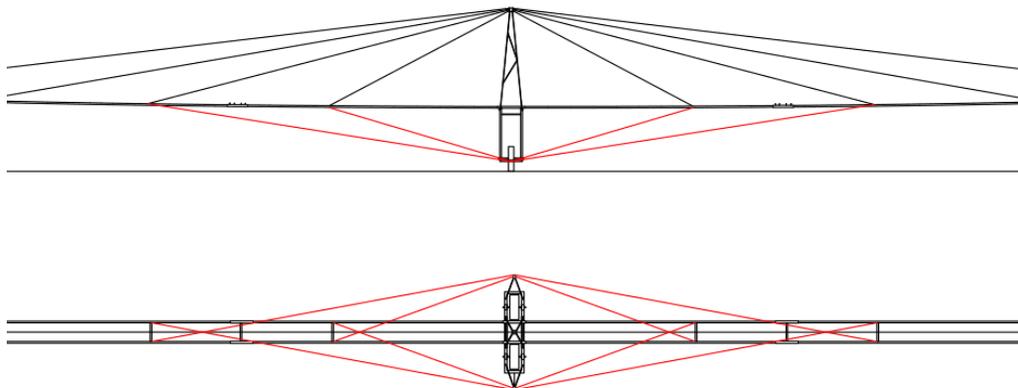
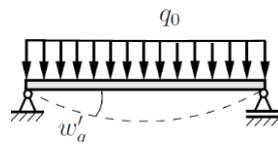


Abbildung 17: Abspannen des Auslegers

- Größere Erfolgsaussichten hat eine Neukonstruktion. Das Ziel ist eine leichte Konstruktion zu finden, die in sich eine höhere Stabilität bzw. Steifigkeit

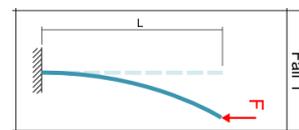
aufweist. Stahlseile sollten hauptsächlich zum Abtragen des Gewichtes dienen nicht zur Erhöhung der Stabilität eingeplant werden. Da es keine einfache Berechnungsmethode gibt, bietet Tabelle 5 die Möglichkeit Rückschlüsse für eine Neukonstruktion zu ziehen. Tabelle 5 zeigt eine Datenmatrix, mit welcher verschiedene Stahlprofile bezüglich des Gewichtes und zweier Festigkeitsparameter miteinander verglichen werden können.

Der Ausleger ist mehreren Belastungsarten ausgesetzt. Diese setzen sich so komplex zusammen, dass es dem Autor nicht möglich ist, diese eindeutig festzulegen und zu berechnen. Um dennoch Aussagen über die bestehende Konstruktion bezüglich deren Festigkeit treffen zu können, wird die Konstruktion auf die Rundrohre mit dem zugehörigen Flächenträgheitsmoment und der maximalen Knickbelastung reduziert. Das Flächenträgheitsmoment ist eine Kennziffer für die Durchbiegung (s. Abbildung 18) und die Knickbelastung zeigt die Anfälligkeit für senkrechte, axiale Belastungen (s. Abbildung 19). Für die Berechnung ist der 1. Eulersche Fall mit einem festen und einem freien Ende ausgewählt.



Quelle: (Gross et al. 2010)

Abbildung 18: Durchbiegung



Quelle: www.maschinenbau-wissen.de/

Abbildung 19: Knickbelastung

Im aufgebauten Zustand wurden weder bleibende Verformungen durch die Durchbiegung, noch Anzeichen für die Knickungsgefahr erkannt. Es kann somit geschlussfolgert werden, dass die Rohre für die Belastung geeignet sind. Es sei nochmals angemerkt, dass es sich um eine starke Vereinfachung handelt. Die Referenzwerte stammen von dem aktuell verwendeten Rundrohr $\varnothing 33,7 \times 3,2$ mm. Anzustreben ist ein leichteres Profil mit deutlich höherem Flächenträgheitsmoment. Die maximale Knickdruckkraft ist hingegen als unkritisch zu betrachten und muss nicht zwingend steigen. Die Berechnungen erfolgen über die Internetseite <https://www.johannes-strommer.com/rechner/>.

Tabelle 5: Vergleich Stahlprofile

Profil	Gewicht [kg/m]	Flächenträgheitsmoment I [mm ⁴]	Knickdruckkraft F_K [kN]
Ø 33,7 x 3,2 mm	2,41	36047	2,075
Ø 45 x 2 mm	1,61	48544	2,795
Ø 50 x 1,5 mm	1,80	67265	3,873
Ø 55 x 1,5 mm	1,98	90272	5,197
40 x 30 x 2 mm	2,08	58912	2,146
45 x 30 x 1,5 mm	1,70	61115	1,863
50 x 30 x 1,5 mm	1,82	78898	2,039
60 x 35 x 1,5 mm	2,17	136152	3,381

Es empfiehlt sich ein Profil mit den Maßen 50 x 30 x 1,5 mm. In Kombination mit dem nachfolgenden Punkt kann daraus ein Ausleger mit gleichem Gewicht aber deutlich erhöhter Stabilität entstehen.

- Der Querschnitt des Auslegers sollte möglicherweise eine Dreiecksform haben. Dadurch ergibt sich eine höhere Steifigkeit, sowohl in der horizontalen als auch in der vertikalen Ebene. Beispielhaft ist in Abbildung 20 eine mögliche Ausführung des Auslegers skizziert. Die beiden Auslegerarme werden nach wie vor über Querstreben zwischen den unteren beiden Profilen durch Stahlseile abgehängt. Diagonale Verstrebungen zum oberen Profil verleihen dem Ausleger mehr Stabilität.

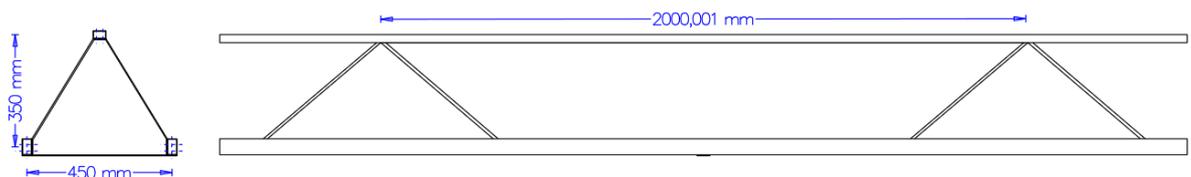


Abbildung 20: Dreiecksträger

- Je nach Größe des/der ausgewählten Motor/en kann nur eine Achse oder beide Achsen angetrieben werden. Kettenräder sind vorhanden und liegen bei Heiko Tostmann in der Werkstatt der Universität.
- Die Klemmverbindung aus Abbildung 7 kann durch eine Steckverbindung vereinfacht werden. In Abbildung 21 ist skizziert, wie das aussehen kann. In die beiden verbindenden Rohrenden wird ein kleineres Profil geschoben, welches in der Mitte einen Anschlag hat. Das können Schweißpunkte sein, ein durchgehender Bolzen oder ein Splint.

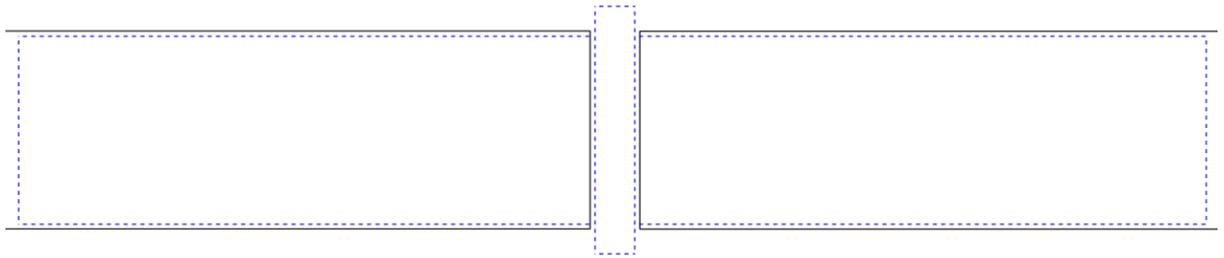


Abbildung 21: Steckverbindung

- Für die Steuerung des / der Motoren kann ein Intervallschalter verwendet werden. Ein möglicher Intervallschalter mit Sekundenfunktion findet sich auf der Internetseite M.R.S. <https://www.mrs-shop.com/micro-timer-intervallschalter-mit-sekundenfunktion.html>.
- Für Personen, die zukünftig weiter an der Beregnungsanlage bauen möchten, sei hier der Hinweis gegeben, dass sich die Materialien sowohl auf dem Versuchsgelände als auch in der Werkstatt der Universität befinden. Die Ansprechpersonen dafür sind Herr Schellert und Herr Tostmann aus dem Fachgebiet Agrartechnik.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Über die mehrmonatige Planungs- und Bauzeit ist ein Prototyp nach den Vorgaben aus der Einleitung entstanden. Die Statik der Berechnungsanlage besteht aus leichtbeschaffbaren und kostengünstigen Materialien. Der Aufbau gestaltet sich durch die simple Konstruktion als einfach und kann auch von Laien mit einer entsprechenden Anleitung durchgeführt werden. Dennoch besteht insbesondere am Ausleger weiterer Optimierungsbedarf. Mit den Erkenntnissen aus dieser Arbeit und den Hinweisen aus Kapitel 5 sollte eine fahrtüchtige, für den Dauereinsatz geeignete Konstruktionslösung gefunden werden. Trotz des noch bestehenden Forschungsbedarfs ist mit dieser Arbeit das Ziel einer kleinskaligen, ressourcenschonenden Berechnungsanlage, deutlich näher gerückt.

Literaturverzeichnis

Banse, Bettina; Belau, Till; Block, Renate; Hack, Gabriele; Kleber, Jürgen; Lemmer, Andreas et al. (Hg.) (2018): Bewässerungs- und Düngungssysteme im Gartenbau.

Wasserwirtschaftliche Anforderungen. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL-Heft, 121).

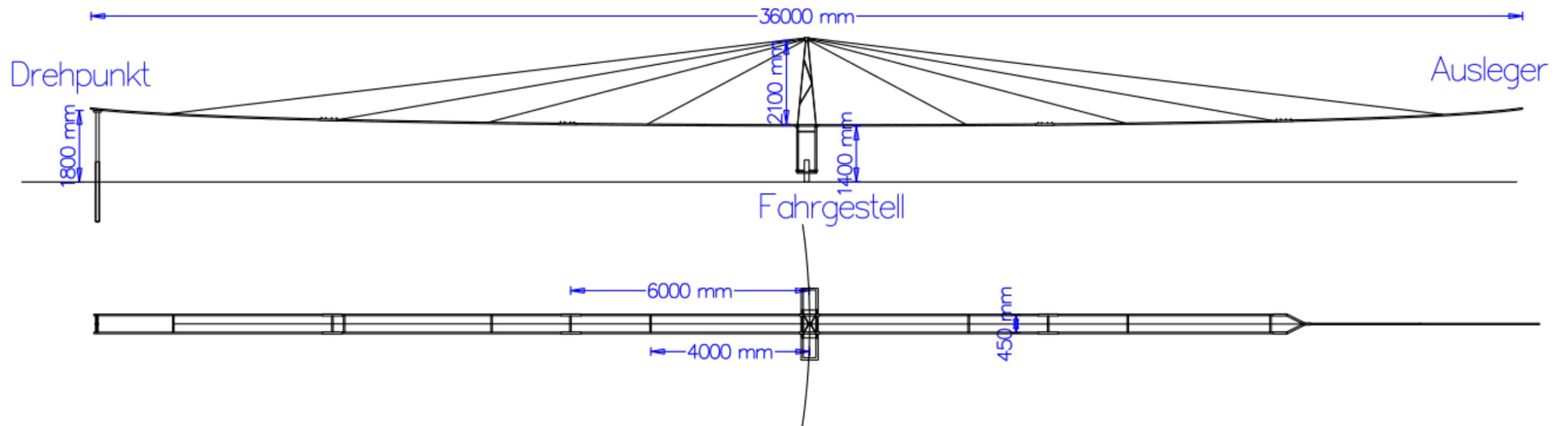
Cordes, Inken; Hemme, Luisa; Herzer, Nicolas; Imrecke, Eva; Kruse, Fabian; Lück, Sven et al. (2019): Planung und Bau einer Kreisberegnungsanlage. Projektarbeit. Universität Kassel, Witzenhausen.

Gross, Dietmar; Ehlers, Wolfgang; Wriggers, Peter (Hg.) (2010): Formeln und Aufgaben zur technischen Mechanik. 9. bearb. und erg. Aufl. Berlin: Springer (Springer-Lehrbuch).

Mitschke, Manfred; Wallentowitz, Henning (2014): Dynamik der Kraftfahrzeuge. 5., überarb. u. erg. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg (VDI-Buch).

Roth-Kleyer, Stephan (2016): Bewässerung im Garten- und Landschaftsbau. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.

Anhang A



Anhang B



Anhang C

Bezeichnung	Anzahl / Menge	Abmessungen	Bezugsquelle
Fahrgestell			
Autoreifen	2 Stk	Ø 550 mm	Reifenhandel
Stehlager	4 Stk	UCP204 – Welle: 20 mm	Kugellager Express GmbH
Welle	1000 mm	Ø 20 mm	Lagermaterial Uni
Schrauben	8 Stk	M 8 x 80 mm	Lagermaterial Uni
Schrauben	8 Stk	M 8 x 35 mm	Lagermaterial Uni
Muttern	16 Stk	M 8	Lagermaterial Uni
Schrauben	4 Stk	M 6 x 40 mm	Lagermaterial Uni
Muttern	4 Stk	M 6	Lagermaterial Uni
Rechteckprofil	4600 mm	30 x 50 mm	Lagermaterial Uni
Rechteckprofil	5000 mm	25 x 25 mm	Lagermaterial Uni
Rundprofil	16400 mm	Ø 17 mm	Lagermaterial Uni
div. Flachmaterial			Lagermaterial Uni
Winkelprofil	1400 mm	50 x 50 x 5 mm	Lagermaterial Uni
Ausleger			
Rohr, verzinkt	72 m	Ø 33,7 x 3,2 mm	Meinolf Gockel
Stahlseil	85 m	Ø 6 mm	Detec
Kauschen	16 Stk	Ø 6 mm	Detec
Seilklemmen	64 Stk	Ø 6 mm	Detec
T-Rohrverbinder	18 Stk	Ø 33,7 mm	Averde
Spannschrauben	8 Stk	M 8	Lagermaterial Uni
Muttern	8 Stk	M 8	Lagermaterial Uni
Rohr	4 m	Ø 35 mm	Lagermaterial Uni
Schrauben	24 Stk	M 8 x 35 mm	Lagermaterial Uni
Muttern	24 Stk	M8	Lagermaterial Uni
Drehpunkt			
Rohr	2,8 m	Ø 80 mm	Lagermaterial Uni
Flanschlager	1 Stk	Ø 80 mm	Lagermaterial Uni
U-Schelle	2 Stk	M 6	Lagermaterial Uni
Muttern	4 Stk	M 6	Lagermaterial Uni
div. Flachmaterial			Lagermaterial Uni

Eigenständigkeitserklärung

„Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst, ganz oder in Teilen noch nicht als Prüfungsleistung vorgelegt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Sämtliche Stellen der Arbeit, die benutzten Quellen im Wortlaut oder dem Sinn nach, entnommen sind, habe ich durch Quellenangaben kenntlich gemacht. Ich erkläre mein Einverständnis zur Überprüfung der von mir eingereichten Arbeit auf Plagiate durch eine Anti-Plagiatssoftware. Zu diesem Zweck stelle ich eine anonymisierte elektronische Form des Dokuments in gängigem Format zur Verfügung.“

20.12.2020

Datum

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'M. Damm' with a stylized flourish at the end.

Unterschrift