Bachelor-Thesis an der Hochschule Luzern - Technik & Architektur

Titel	**Konzept eines Systems zum Antreiben und Kontrollieren eines Sprüharmes in einer Reinigungsanlage**
Diplomandin/Diplomand	**Geisseler Samuel**
Bachelor-Studiengang	**Bachelor Maschinentechnik**
Semester	**FS21**
Dozentin/Dozent	**Prof. Dr. Lodewyks Johann**
Expertin/Experte	**Haller Ruedi**

Alle Rechte vorbehalten. Die Arbeit oder Teile davon dürfen ohne schriftliche Genehmigung der Rechteinhaber weder in irgendeiner Form reproduziert noch elektronisch gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Sofern die Arbeit auf der Website der Hochschule Luzern online veröffentlicht wird, können abweichende Nutzungsbedingungen unter Creative-Commons-Lizenzen gelten. Massgebend ist in diesem Fall die auf der Website angezeigte Creative-Commons-Lizenz.

1 Abstract Deutsch

Die vorliegende Bachelorarbeit zeigt die Entstehung einer möglichen Lösung für die Sprüharmkontrolle in einer Reinigungsanlage. Das Projekt wird zusammen mit der Firma Belimed Life Science als Industriepartner erarbeitet. Ziel dieser Arbeit ist es ein System zu entwickeln, das die Drehgeschwindigkeit und Drehrichtung von Sprüharmen in einer Reinigungsanlage steuer- und regelbar macht. Die Anlagen, für die das System entwickelt wird, kommen hauptsächlich für die Reinigung von pharmazeutischen Gerätschaften zum Einsatz.

Mit Hilfe eines Brainstormings und Recherchearbeiten werden mögliche Lösungen übersichtlich in verschiedenen morphologischen Kästen dargestellt. Durch Diskussionen mit Fachleuten der Firma Belimed Life Science und einer Nutzwertanalyse werden die weniger geeigneten Lösungen Schritt für Schritt aussortiert. Die Schlussentscheidung des zu entwickelnden Konzeptes wird schliesslich durch Vorversuche gestützt um die Praxistauglichkeit von Anfang an mitbeurteilen zu können.

Der Lösungsvorschlag für die vorhandene Problemstellung besteht aus dem Antrieb des Sprüharmes mit Hilfe eines Wasserrades. Dieses wird durch dasselbe Wasser angetrieben, das auch für die Reinigung verwendet wird. Dadurch sind keine zusätzlichen Betriebsmittel nötig und die Anforderungen bezüglich Temperatur- und Wasserbeständigkeit können erfüllt werden. Die Drehzahl des Wasserrades und somit des Sprüharmes kann über proportionale Stromventile stufenlos eingestellt werden. Durch die unterschiedliche Anordnung der Wasserdüsen für das Antriebswasser kann die Drehzahl während des Betriebes umgekehrt werden.

Das entwickelte Konzept wird mit Hilfe eines Funktionsmodells auf ihre Funktionen und Tauglichkeit geprüft. Der dazu gehörende Testbericht liegt in dieser Arbeit aus Zeitgründen nicht vor. Er wird jedoch nachgereicht und als separates Dokument angefügt.

2 Abstract Englisch

This bachelor thesis shows the development of a possible solution for spray arm control in a cleaning plant. The project is being developed together with the company Belimed Life Science as an industrial partner. The aim of this work is to develop a system that makes the rotational speed and direction of spray arms in a cleaning plant controllable and adjustable. The plants for which the system is being developed are mainly used for cleaning pharmaceutical equipment.

With the help of brainstorming and research work, possible solutions are clearly presented in various morphological boxes. Through discussions with representatives of Belimed Life Science and a utility analysis, the less suitable solutions are sorted out step by step. The final decision of the concept to be developed is finally supported by preliminary tests in order to be able to assess the practicability from the beginning.

The proposed solution for the existing problem consists of driving the spray arm with the help of a water wheel. This is driven by the same water that is used for cleaning. This means that no additional operating materials are required and the requirements regarding temperature and water resistance can be met. The speed of the water wheel and thus of the spray arm can be infinitely adjusted via proportional flow control valves. By arranging the water nozzles for the drive water in different ways, the speed can be reversed during operation.

The developed concept is tested for its functions and suitability with the help of a functional model. Due to time constraints, the corresponding test report is not available in this paper. However, it will be submitted later and attached as a separate document.

Ort, Datum Buttisholz, 10.06.2021

© Geisseler Samuel, Hochschule Luzern – Technik & Architektur

3 Danksagung

Ein grosser Dank geht an die Firma Belimed Life Science. Dank der Eingabe ihrer Problemstellung konnte die vorliegende spannende Arbeit durchgeführt werden. Dabei sind speziell Jochen Schlag und Jürgen Althammer zu erwähnen, welche die Interessen von Belimed Life Science vertraten. Besonders durch die Unterstützung von Jochen Schlag konnten Fragen und Anliegen stets schnell geklärt werden. Ausserdem konnten durch seine Unterstützung viele Lehren in Bezug auf das Vorgehen bei der Durchführung von Projekten in der Industrie gezogen werden.

Ein grosser Dank geht auch an den betreuenden Dozenten Prof. Dr. Johann Lodewyks, der das ganze Projekt begleitete und unterstützte.

Inhalt

1 Abstract Deutsch I

2 Abstract Englisch II

3 Danksagung III

4 Einleitung 1

4.1 Eingrenzung des Projektes 2

5 Ziele 3

6 Belimed Life Science 3

7 Analyse bestehender Reinigungsprozess 4

8 Anforderungen 4

8.1 Anforderungsliste 5

8.2 Waschgutträger 7

8.3 FDA-Zertifikat 7

9 Morphologischer Kasten 8

10 Lösungskombinationen 9

11 Vorversuche 10

11.1 Erste Berechnungen zu den Vorversuchen 11

11.1.1 Massenträgheitsmoment 11

11.1.2 Antriebsmoment durch Trägheit 13

11.1.3 Antriebsleistung durch Trägheit 14

11.2 Durchführung Vorversuche 15

11.2.1 Pneumatik Motor (Lamellenmotor) 15

11.2.2 Wasserrad ohne Übersetzung 16

11.2.3 Wasserrad mit Übersetzung ohne Gehäuse 18

11.2.4 Elektromotor (Schrittmotor) 19

11.3 Resultate aus den Vorversuchen 21

11.4 Volumenstrommessung 21

11.5 Berechnung effektive Antriebsleistung 22
11.6 Vorauslegung Wasserantrieb 27
12 Lösungskonzept 29
12.1 Auslegung Durchmesser Wasserrad 30
12.2 Wassereinsparpotenzial 34
12.3 Werkstoffe 35
12.4 Auslegung der Stirnräder für die Übersetzung 35
12.5 Planetengetriebe 38
12.6 Lager 39
12.7 Wellendichtringe 42
12.8 Wasserdüsen 43
12.9 Ventile 43
12.10 Konstruktion 43
12.11 Regelung 49
12.12 Materialkosten 51
13 Funktionsmodell 52
13.1 3D-Druck 52
13.2 Metallteile 53
13.3 Zusammenbau 53
13.4 Probleme 56
13.5 Test 58
14 Technische und wirtschaftliche Bewertung 58
15 Fazit 59
16 Ausblick 61
17 Schlusswort 61
18 Literaturverzeichnis 63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hauptsitz von Belimed Life Science in Sulgen TG (Belimed Life Science, 2021) 3
Abbildung 2: Waschgutträger 7
Abbildung 3: Bauteile des Wascharmes 12
Abbildung 4: Vorversuch Pneumatik Motor 15
Abbildung 5: Vorversuch Wasserrad ohne Gehäuse und ohne Übersetzung 17
Abbildung 6: Vorversuch Wasserrad mit Gehäuse und ohne Übersetzung 18
Abbildung 7: Vorversuch Wasserrad mit Übersetzung 19
Abbildung 8: Anschlussschema Schrittmotor 20
Abbildung 9: Versuchsaufbau Schrittmotor 20
Abbildung 10: Messung Volumenstrom 2 mm und 3 mm Düse 22
Abbildung 11: Bohrungen und Wasserfluss am Wascharm 23
Abbildung 12: Vorauslegung Wasserrad ohne Getriebe 28
Abbildung 13: Vorauslegung Wasserrad mit Getriebe 29
Abbildung 14: Schema Antriebssystem 30
Abbildung 15: Plot der Antriebsmomente 32
Abbildung 16: Berechnung mit Matlab 33
Abbildung 17: Konstruktion Wasserrad mit Peltonschaufeln 34
Abbildung 18: Berechnung Verzahnung mit KISSsoft 37
Abbildung 19: Berechnung Festigkeit mit KISSsoft 38
Abbildung 20: Planetengetriebe Serie 20/1R (Faulhaber, 2021) 39
Abbildung 21: Kräfte am Zahnrad 39
Abbildung 22: Querkraft durch Wasserrad 40
Abbildung 23: Äussere Belastung des Wascharmes 40
Abbildung 24: Bauteile und Kraftfluss des Antriebes 44
Abbildung 25: Gesamtansicht Drehbewegung 45
Abbildung 26: Befestigung Getriebegehäuse 46
Abbildung 27: Deckel Getriebegehäuse 46
Abbildung 28: Hygienisches Design 47
Abbildung 29: Systemgrenze Reinigungsmedium 48
Abbildung 30: Abmasse Antriebssystem 48
Abbildung 31: Wasserbohrungen bei Waschgütern unterhalb des Wascharmes 49
Abbildung 32: Schematischer Aufbau des Antriebssystems 50
Abbildung 33: Grafische Darstellung Kostenzusammensetzung 51

Abbildung 34: 3D-Drucker 52
Abbildung 35: Zusammenbau des Funktionsmodells 53
Abbildung 36: Zusammengebautes Funktionsmodell 54
Abbildung 37: Explosionszeichnung 55
Abbildung 38: Wellendichtring 56
Abbildung 39: Dichtung Rillenkugellager 61806-2RS1 57
Abbildung 40: Montage einer Distanzscheibe 57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anforderungsliste 6
Tabelle 2: Morphologischer Kasten Antrieb Elektrisch 8
Tabelle 3: Bewertete Lösungskombinationen 9
Tabelle 4: Nutzwertanalyse 10
Tabelle 5: Berechnung Massenträgheit des originalen Wascharmes 12
Tabelle 6: Berechnung Massenträgheit des Wascharm-Modells 13
Tabelle 7: Resultate Vorversuche 21
Tabelle 8: Preiszusammenstellung 51
Tabelle 9: Fazit Anforderungsliste 60

4 Einleitung

Man kennt es, die Spülmaschine ist voll mit schmutzigem Geschirr, der Reinigungsvorgang wird gestartet und nach dem Reinigungsvorgang werden saubere Teller, Gläser und Besteck erwartet. In die Spülmaschine werden verschiedenste Hilfsmittel aus der Küche gelegt, bei denen der Wasserstrahl der Spülmaschine nicht überall hinkommt und diese nach dem Reinigungsprozess schliesslich nicht sauber sind. Ähnlich verhält es sich bei der Reinigung von Pharmazeutischen Behältnissen, dazugehörigen Armaturen und weiteren verunreinigten Bauteilen. Die Wascharme der Reinigungsanlagen für pharmazeutische Anwendungen funktionieren grundsätzlich gleich wie diese von Spülmaschinen. Sie werden durch herausströmendes Wasser angetrieben und drehen sich je nach Widerstand schneller oder langsamer. Durch die festgelegten Antriebsbohrungen drehen diese Arme nur in eine Richtung, was die Gefahr von Sprühschatten (Stellen bei denen der Wasserstrahl nicht direkt hinkommt) erhöht. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, das Konzept eines Systems zu entwickeln, mit dem die Drehzahl der Wascharme belastungsunabhängig eingestellt und die Drehrichtung umgekehrt werden kann.

Dazu wird zuerst eine Anforderungsliste erstellt, welche den Rahmen dieses Projektes vorgibt. Mit Hilfe von Recherche und einem Brainstorming werden verschiedene Möglichkeiten zum Erfüllen der Forderungen gesucht. Die Ergebnisse aus diesem Prozess werden in mehreren morphologischen Kästen gegliedert und dargestellt, um daraus mögliche Lösungskombinationen zu erstellen. Mit Hilfe von Diskussionen mit Spezialisten der Belimed Life Science und einer Nutzwertanalyse werden erste ungeeignete Kombinationen verworfen, damit dessen Anzahl überschaubar wird. Um die Vor- und Nachteile der übrigen Lösungskombinationen besser ersichtlich zu machen, werden Vorversuche durchgeführt. Dabei werden Antriebe mit Pneumatik, Wasser und Elektrik untersucht. Die daraus entstandenen Ergebnisse werden zusammen mit der Nutzwertanalyse zur Festlegung des Konzeptes verwendet.

Das am besten geeignete Konzept besteht aus einem Antrieb mit Wasser. Dafür wird Reinigungswasser im Nebenstrom verwendet, das ein Wasserrad mit Peltonschaufeln antreibt. Das Antriebsmoment wird über ein zweistufiges Planetengetriebe und ein Stirnradgetriebe stark erhöht um die Störanfälligkeit zu minimieren. Die Anordnung der Peltonbecher ist so gestaltet, dass das Wasserrad in beide Drehrichtungen betrieben werden kann. Daher ist es möglich, die Drehrichtung des Wascharmes umzukehren. Das Wasserrad wird jeweils durch zwei Wasserdüsen pro Drehrichtung mit Wasser angetrieben. Bei der Konstruktion des gesamten Antriebes und dessen Verkleidungen wird auf ein hygienisches Design geachtet. Es darf nirgends Wasser liegenbleiben, das zur Entstehung und Vermehrung von

Bakterien führen würde. Trotz dem Antrieb mit Wasser kann mit Hilfe von diesem Konzept der Wasserverbrauch reduziert werden, weil dessen Energie effizienter genutzt werden kann.

Die Auslegung eines Reglers, der die Drehzahl des Wascharmes dem Sollwert anpasst, liegt nicht im Umfang dieser Arbeit. Es wird allerdings ein Vorschlag für einen ersten Reglerentwurf gemacht. Die Entwicklung von Wasserdüsen und Ventilen wird ausserdem nicht thematisiert. Die Wasserdüsen werden von einem Düsenhersteller gekauft. Die Auslegung von Wasserventilen wird überschlagsmässig durchgeführt. Die genaue Auslegung von Ventilen ist nach erfolgreichen Tests mit einem Funktionsmodell und damit verbundener Kontaktaufnahme mit entsprechenden Ventilherstellern vorgesehen. Diese Arbeit handelt von der Entwicklung, rechnerischen Auslegung und Konstruktion eines Systems zur Kontrolle von Wascharmen in einer Reinigungsanlage.

Zur Validierung dieses Konzeptes wird ein Funktionsmodell gebaut. Die dafür verwendeten Materialien entsprechen nicht den geforderten Stoffen für die Einhaltung hygienischer Vorschriften und der Temperaturfestigkeit. Das Funktionsmodell dient ausschliesslich zum Test des entwickelten Antriebes mit Wasser. Aus den Erkenntnissen des Tests können eine Standortbestimmung des Konzeptes gemacht und eine allfällige Weiterentwicklung unterstützt werden. Da die Zeit bis zur Abgabe der vorliegenden Projektdokumentation nicht reicht um die Validierung abzuschliessen, wird ein vollständiger Testbericht als separates Dokument zu dieser Arbeit nachgeliefert.

4.1 Eingrenzung des Projektes

Das Projekt beinhaltet das Suchen von verschiedenen möglichen Lösungskonzepten und dessen Beurteilung mit Hilfe einer Nutzwertanalyse. Das beste Lösungskonzept wird ausgearbeitet und die wichtigsten dafür benötigten Komponenten für den entsprechenden Einsatz ausgelegt. Nach der Auslegung und 3D-Konstruktion soll ein Funktionsmodell gebaut werden um die Funktion des Konzeptes analysieren zu können. Von den durchgeführten Tests wird ein Bericht geschrieben, der die Funktion, Vor- und Nachteile, Probleme, Messdaten etc. enthält. Für die Anwendung des Systems bei Waschgutträgern werden Kupplungen benötigt (siehe Kapitel 8.2 «Waschgutträger»). Die Auslegung und Konstruktion dieser Kupplung ist jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit, da diese Variante vorläufig noch nicht zum Einsatz kommt.

Das Lösungskonzept befasst sich ausschliesslich mit der Kontrolle des Sprüharmes. Der Einfluss dieses Systems auf das Reinigungsergebnis wird nicht untersucht.

5 Ziele

Die Ziele dieser Arbeit liegen beim Erlernen und Festigen eines methodischen Vorgehens zum Lösen von technischen Problemen. Aus diesen Erfahrungen können wichtige Erkenntnisse gezogen werden, die ein Maschinenbauingenieur im Berufsalltag benötigt. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist es, ein bestmögliches Lösungskonzept für die Kontrolle eines Wascharmes zu finden und somit den Wünschen und Vorstellungen des Auftraggebers gerecht zu werden. Das Projekt gilt als erfolgreich, wenn alle Festanforderungen der Anforderungsliste erfüllt werden.

6 Belimed Life Science

Die Firma Belimed Life Science gehört zur Belimed Gruppe (Metall Zug, 2018). Die Gruppe mit dem Geschäftsbereich «Infection Control» baut Systemlösungen für die Reinigung, Desinfektion und Sterilisation. Diese kommen hauptsächlich in der medizinischen und der pharmazeutischen Industrie zum Einsatz. Die Belimed Life Science ist spezialisiert auf pharmazeutische Anwendungen und wird daher im Untersegment «Life Science» eingeordnet. Die Schwesterfirma Belimed Medical bedient dagegen den medizinischen Markt mit Reinigungs-, Desinfektions-, und Sterilisationsanlagen. Die Belimed Gruppe gehört zur Metall Zug Gruppe, zu der auch der Haushaltsapparate Hersteller V-Zug AG, die V-Zug Kühltechnik AG, die SIBIRGroup AG und die Gehrig Group AG gehören (ebd.).

Der Hauptsitz der Belimed Life Science liegt in Sulgen TG. Dort werden die Systemlösungen entwickelt und produziert. Ein weiterer Produktionsstandort liegt in Grosuplje Slowenien. (Metall Zug, 2018)

Abbildung 1: Hauptsitz von Belimed Life Science in Sulgen TG (Belimed Life Science, 2021)

7 Analyse bestehender Reinigungsprozess

Aktuell besteht der zu optimierende Reinigungsprozess aus Anlagen, die zwei bis acht Reinigungsrotoren beinhalten. Diese Rotoren verfügen über je 2 Arme, die mit Wasserdüsen ausgestattet sind. Diese Wasserdüsen sind leicht abgewinkelt montiert, um möglichst jeden Winkel des Waschgutes erreichen zu können. Durch separate 90 Grad zur Drehachse montierte Wasserauslassöffnungen drehen sich die Rotoren um die eigene Achse. Für den Antrieb wird der Impuls des herausströmenden Wassers genutzt. Jedoch kann diese Drehbewegung der Rotoren nur durch den vorgängig eingestellten Reinigungswasserdruck beeinflusst werden. Die Drehrichtung dieser Wascharme ist ausserdem durch den fest eingestellten Winkel der Austrittsöffnungen nicht umkehrbar. Aus diesem Grund können trotz optimalen Wasserdüsenwinkeln am Waschgut Stellen entstehen, die vom Wasserstrahl nicht erreicht und somit nicht zu 100 Prozent gereinigt werden. Die Drehzahl der Rotoren wird auf Wunsch durch einen induktiven Drehzahlsensor detektiert und im System protokolliert.

Die Reinigungsanlagen arbeiten mit unterschiedlichen Reinheitsklassen von Wasser, die abhängig von der Reinigungsanforderung bestimmt werden. Der Reinigungsprozess läuft in verschiedenen Phasen ab. Dabei wird pro Phase eine bestimmte Menge von Wasser in einen Tank der Anlage gepumpt. Während des Reinigungsvorganges wird das verschmutzte Wasser aus dem Reinigungsraum gefiltert und wieder zurück in den Tank zurückgefördert. Das Wasser wird somit pro Phase mehrmals verwendet. Wenn die laufende Reinigungsphase fertig ist, wird das verschmutzte Wasser abgepumpt und die Anlage wird wieder mit frischem Wasser aufgefüllt. Um die Reinigungskraft des Wassers zu verbessern, wird es je nach Phase mit Reinigungsmittel versetzt. Diese Angaben stammen aus Gesprächen mit Spezialisten der Belimed Life Science.

8 Anforderungen

In diesem Kapitel werden die Anforderungen des Auftraggebers Belimed Life Science an den Antrieb des Wascharmes formuliert. In einer Liste werden die Anforderungen übersichtlich dargestellt und zwischen Fest- und Wunschanforderungen unterschieden (Erstellen der Anforderungsliste, 2009).

8.1 Anforderungsliste

Die Anforderungsliste ist eine Zusammenfassung aller Forderungen, die der Auftraggeber oder die Auftraggeberin an ein Projekt stellt. Dazu sind alle geforderten Punkte so definiert, dass sie mess- und überprüfbar sind. Die Anforderungsliste gilt während der gesamten Dauer eines Projektes als Leitfaden. Die Forderungen werden als Wunsch- oder Festanforderungen definiert (Erstellen der Anforderungsliste, 2009). Für den erfolgreichen Abschluss eines Projektes müssen dabei alle Festanforderungen erfüllt sein. Die Wunschanforderungen gelten als nicht zwingend. Das Ziel sollte jedoch sein, die Wunschanforderungen bestmöglich zu erfüllen (ebd.).

Die Anforderungen an die Kontrolle der Sprüharme in einer Reinigungsanlage beinhalten beispielsweise den Druck des Reinigungsmediums, die Drehgeschwindigkeit als fester Wertebereich, die maximale Regelzeit, die Materialverträglichkeit mit dem Reinigungsmedium und den Arbeitstemperaturbereich (siehe Tabelle 1 «Anforderungsliste»). Eine erweiterte Anforderung von Belimed Life Science ist es, dass die Kontrolle des Reinigungsarmes ohne nennenswerten Zusatzaufwand bei den von ihnen gebauten Racks verbaut werden kann. Die Racks sind Waschgutträger, die ausserhalb der Reinigungsanlage mit den Waschgütern beladen werden und beladen in die Maschine gefahren werden können (siehe Kapitel 8.2 «Waschgutträger»). Dabei besitzen die Racks eigene Wascharme, die über Kupplungen mit dem Reinigungsmedium versorgt werden. Die Anforderung für die Racks wird jedoch als Zusatzanforderung behandelt und daher nicht in der Anforderungsliste vermerkt. Die Anforderungen werden mit Hilfe eines Funktionsmodelles überprüft.

Tabelle 1: Anforderungsliste

Auftraggeber Belimed Life Science		Anforderungsliste System zur Kontrolle des Sprüharms in einer Reinigungsanlage	Auftragnehmer Samuel Geisseler	Seite 1/1
Nr.	**Fest / Wunsch**	**Thema**	**Erklärung**	**Geändert**
1	Fest	Wasserdruck	Der Wasserdruck für die Düsen liegt zwischen 0.8 und 1.7 bar und darf nicht geändert werden.	23.02.2021
2	Fest	Drehgeschwindigkeit	Die Drehgeschwindigkeit des Sprüharmes muss regelbar sein.	23.02.2021
3	Fest	Drehgeschwindigkeit	Die Drehgeschwindigkeit der Sprüharme muss auf eine Geschwindigkeit zwischen 25 und 45 U/min ±5% geregelt werden können.	08.03.2021
4	Wunsch	Regelzeit	Die Zeit für das Erreichen der Solldrehzahl der Sprüharme beträgt maximal 10 Sekunden.	22.03.2021
5	Fest	Änderungen	Der Wasserströmquerschnitt für das Reinigungsmedium darf nicht kleiner als der Rohrquerschnitt eines 20 mm Rohres (314 mm^2) sein.	08.03.2021
6	Wunsch	Drehrichtung	Die Drehrichtung des Sprüharmes soll umkerbar sein.	23.02.2021
7	Wunsch	Änderungen	Es sollte an der bestehenden Maschine so wenig wie möglich geändert werden.	24.02.2021
8	Fest	Material	Alle Komponenten in der Waschkammer, welche mit einem Medium in Kontakt kommen, das danach in der Waschkammer verwendet wird, müssen aus AISI 304, AISI 316L oder einem bereits von der Belimed Life Science verwendeten Kunststoff bestehen.	09.03.2021
9	Wunsch	Durchfluss	Der Volumenstrom von Reinigungswasser durch einen Wascharm beträgt maximal 5000 l/h.	01.03.2021
10	Fest	Temperaturbereich	Der Temperaturbereich des Reinigungsmediums liegt zwischen 15 und 93°C. Bei der Trocknung werden Temperaturen von 120°C erreicht.	08.03.2021
11	Fest	Medien	Als Reinigungsmedium wird flüssiges Wasser verwendet, das mit Reinigungsmittel versetzt sein kann.	08.03.2021
12	Fest	Antriebstechnik	Als Energieversorgung zum Antrieb der Wascharme steht elektrischer Strom mit einer Spannung von 400V 50Hz /24V DC, Druckluft mit einem Druck von max 6 bar und Wasser mit einem Druck von 0.8-1.7 bar zur Verfügung.	08.03.2021
13	Wunsch	Drehzahlmessung	Die Drehzahlmessung sollte wenn möglich in die Antriebstechnik integriert werden.	01.03.2021

8.2 Waschgutträger

Eine zusätzliche Anforderung kam im Verlauf des Projektes hinzu. Dabei handelt es sich um die Kontrolle der Drehbewegung von Wascharmen, die auf sogenannten Waschgutträgern montiert sind. Diese Waschgutträger (auch Rack genannt) werden benötigt, um zu reinigende Güter ausserhalb der Reinigungsanlage beschicken zu können. Diese Racks werden nach dem Beladen in die Reinigungsanlage befördert und fixiert. Die Versorgung mit Reinigungswasser geschieht dabei über spezielle Kupplungen (siehe Abbildung 2 «Waschgutträger»). Da auf diesen Waschgutträgern häufig spezielle Teile gereinigt werden, sind diese individuell gestaltet und je nach Anforderung mit Wascharmen ausgestattet. Die Anforderung, die Drehbewegung dieser Wascharme kontrollieren und die Versorgungsenergie über eine Kupplung übertragen zu können, gehört laut Aussagen des Auftraggebers nicht in den Anforderungskatalog. Grund dafür ist, dass die Kontrolle zuerst bei den fest verbauten Wascharmen eingesetzt werden soll. In einem späteren Schritt sollte diese Kontrolle jedoch auch für die Wascharme auf den Racks verbaut werden. Aus diesem Grund wird diese Option bei der Entwicklung des vorliegenden Konzeptes mit berücksichtigt.

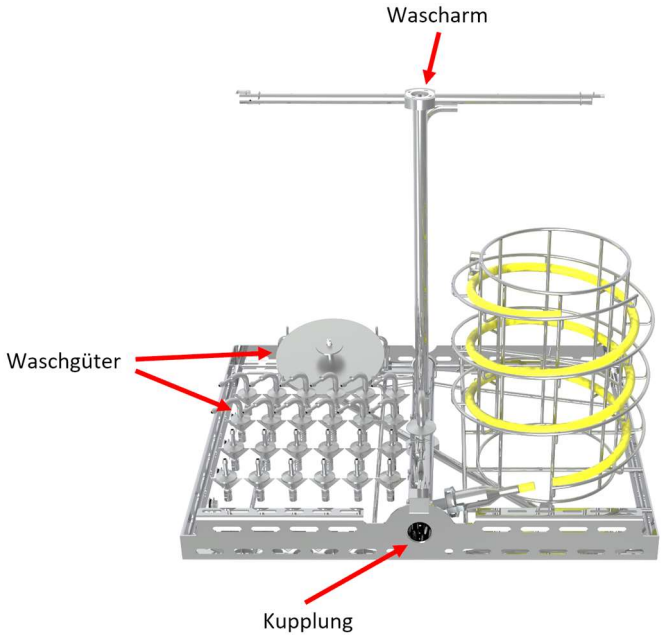


Abbildung 2: Waschgutträger

8.3 FDA-Zertifikat

Damit Materialien beispielsweise für die Lebensmittel-, Pharma- und Medizinindustrie in den Vereinigten Staaten von Amerika (USA) eingesetzt werden dürfen, benötigen sie eine Zulassung der zuständigen staatlichen Behörde mit dem Namen «Food and Drug Administration» (FDA) (Reichelt

Chemietechnik GmbH + Co. , 2021). Diese Zulassung wird auch für Waren benötigt, die in die USA importiert und in den entsprechenden Branchen eingesetzt werden. Mittlerweile hat sich dieses Zertifikat beim internationalen Handel mit Waren für die Lebensmittel-, Pharma- und Medizinal Industrie durchgesetzt und als Standard etabliert. Die Zertifizierung richtet sich nach der Reinheit und Beständigkeit der jeweiligen Materialien für den dafür eingesetzten Prozess. Dies gilt unabhängig davon, ob die Stoffe synthetischen oder natürlichen Ursprungs sind (ebd.).

9 Morphologischer Kasten

Der morphologische Kasten ist eine Kreativitätstechnik, bei der die Ideen zur Lösung eines Problems in einer Tabelle übersichtlich dargestellt werden (Der morphologische Kasten, 2009). Dabei werden die Ideen in verschiedene Teilfunktionen unterteilt. Schlussendlich kann aus jeder Teilfunktion eine Idee mit einer anderen Teilfunktion kombiniert werden. So entstehen verschiedene Lösungsansätze, die anschliessend bewertet und allenfalls verfeinert werden (ebd.).

Bei diesem Projekt stehen mit Pneumatik, Wasserhydraulik und Elektrik drei verschiedene Energieformen für den Antrieb der Reinigungsarme zur Verfügung. Diese Energieformen können untereinander nur schwer kombiniert werden. Aus diesem Grund werden drei verschiedene morphologische Kästen erstellt. Zusätzlich gibt es bei den Antriebsformen mit Fluiden (Pneumatik, Wasserhydraulik) Teilfunktionen, die bei beiden möglich sind. Daher werden für die Pneumatik und Wasserhydraulik zwei weitere morphologische Kästen erstellt, dessen Lösungen einander ergänzen. In Tabelle 2 «Morphologischer Kasten Antrieb Elektrisch» ist ein morphologischer Kasten abgebildet. Die restlichen Kästen mit den Teillösungsideen sind im Anhang Kapitel 2 «Morphologische Kästen» zu finden.

Tabelle 2: Morphologischer Kasten Antrieb Elektrisch

Morphologischer Kasten für die Entwicklung eines Systems zur Kontrolle eines Sprüharms		Antrieb Elektrisch						
Nr.	Teilfunktion	Lösungsprinzip						
		1	2	3	4	5	6	7
1	Wechselstrom Motor	Kollektormotor (Reihenschluss)	Asynchronmotor	Keiner				
2	Drehstrommotor	Synchronmotor	Asynchronmotor	Keiner				
3	Gleichstrom motor	Permanenterregt mit Bürsten	Permanenterregt ohne Bürsten (Brushless)	Elektrisch erregt Reihenschluss	Elektrisch erregt Nebenschluss	Schrittmotor	Elektrisch Fremderregt	Keiner
4	Steuerung der Drehzahl	Spannung	Strom	Frequenz	Digital			
5	Drehzahlerfassung	Strom	Spannung	Encoder	Sensor Aussen (wie bereits verbaut)	Sensor Innen beim Drehpunkt		
6	Regelung der Drehzahl	Strom	Spannung	Frequenz	Digital			
7	Drehrichtungserfassung (Berührungslos)	2 Kanal Drehzahlsensor	2 x 1 Kanal Drehzahlsensor	Hallsensor	Induktivsensor	Encoder	Spannung	Strom

10 Lösungskombinationen

Aus den morphologischen Kästen werden verschiedene mögliche und machbare Teillösungen miteinander kombiniert. Diese Teillösungen werden mit einer ersten Skizze visualisiert und mit Vor- und Nachteilen beschrieben. Nach einer ersten Diskussion mit Vertretern der Belimed Life Science wurden bereits einige Lösungskombinationen als unbrauchbar bewertet und nicht weiterverfolgt. In einem zweiten Schritt werden die verbleibenden Lösungskombinationen jeweils mit einer Schemazeichnung ergänzt. In den Schemazeichnungen sind der Stofffluss des Regelungssystems und die benötigten Bauteile aufgeführt. Mit Hilfe dieser Schemas kann der konstruktionstechnische Aufwand eingeschätzt werden. Die Lösungskombinationen werden im Anhang Kapitel 3 «Lösungskombinationen» ausführlich beschrieben.

Um die Auswahl des bestmöglichen Konzepts zu erleichtern, wird eine Exceltabelle als Nutzwertanalyse verwendet (Studienretter, 2021). Bei dieser Tabelle werden verschiedene Kriterien berücksichtigt und mit einer Zahl zwischen 1 und 5 für jede Lösungskombination bewertet. Die Zahl 1 bedeutet, dass dieses Kriterium nicht erfüllt wird. Hingegen die Zahl 5 bedeutet eine sehr gute Erfüllung dieses Kriteriums. Die Kriterien werden zusätzlich mit einem Gewichtungsfaktor zwischen 1 und 5 multipliziert. Damit kann bei der Bewertung zwischen wichtigen und weniger wichtigen Kriterien unterschieden werden. Schlussendlich werden die Zahlenwerte aller Kriterien pro Lösungskonzept aufsummiert und miteinander verglichen. In Tabelle 3 «Bewertete Lösungskombinationen» sind die einzelnen Lösungskombinationen aufgeführt und jeweils einer Farbe zugeordnet. Diese Farben sind bei der Tabelle 4 «Nutzwertanalyse» wiederzufinden. Die Lösungskombination mit einem elektrischen Antrieb ist in Tabelle 2 «Morphologischer Kasten Antrieb Elektrisch» mit dem grauen Pfad beschrieben.

Tabelle 3: Bewertete Lösungskombinationen

Lösungskombinationen		
1		Pneumatikmotor•Regelung über Volumenstrom•Lamellenmotor
2		Wasserrad aussen•Regelung über Volumenstrom
3		Wasserrad und Getriebe•Regelung über Volumenstrom
4		Kein Wechselstrom Motor•Kein Drehstrom Motor•Gleichstrom Motor: Schrittmotor•Frequenz•Encoder•Frequenz•Encoder

Tabelle 4: Nutzwertanalyse

			1 = Sehr schlecht / 5 = Sehr gut			
			Pneumatisch	Hydraulisch (Wasser)		Elektrisch
Bewetung der Lösungskombinationen			1	2	3	4
	Kriterium	Gewichtungsfaktor				
A	Konstruktiver Aufwand	4	2	4	3	1
B	Änderungen an der bestehenden Anlage	3	3	4	3	2
C	Materialkosten	4	3	4	4	3
D	Zuverlässigkeit	5	5	4	3	3
E	Wartungsintensität	4	3	5	5	4
F	Druckluftverbrauch	2	1	5	5	5
G	Wasserverbrauch	2	5	1	1	5
H	Stromverbrauch	1	3	3	3	1
I	Regelbarkeit	4	3	2	3	4
J	Möglichkeit für Schnellkupplung	3	3	4	4	2
K	GMP-Konformität	5	3	5	4	3
L	Antriebsverhalten	3	3	2	4	5
M	Störverhalten	3	3	2	3	4
		Summe	135	156	152	138

Aufgrund der numerischen Bewertung der vier näher betrachteten Lösungskonzepte zeigt sich, dass die beiden Antriebskonzepte mit einem wasserhydraulischen Antrieb am besten geeignet sind. Diese Bewertungen stützen sich vorwiegend auf Einschätzungen und eigene Erfahrungen, sowie Erfahrungen des Industriepartners. Um die verschiedenen Antriebskonzepte im praktischen Einsatz besser beurteilen zu können, werden erste Vorversuche durchgeführt. Mit Hilfe dieser praktischen Versuche soll die Sichtweise auf die Konzepte erweitert werden und somit Vor- und Nachteile , die in der Theorie nicht ersichtlich sind, aufgezeigt werden. Die Vorversuche haben ausserdem zum Ziel, das dynamische Verhalten und die Reaktion auf äussere Störungen zu testen und zu beobachten, damit für dessen Grössenordnung ein Gefühl gewonnen werden kann.

11 Vorversuche

Zur Unterstützung des Auswahlverfahrens werden Vorversuche durchgeführt. Diese haben zum Ziel, das dynamische Betriebsverhalten des jeweiligen Antriebssystems in der Realität aufzuzeigen und Probleme, die in der Theorie nicht ersichtlich sind, zu erläutern. Die Versuche werden auch dafür verwendet, ein Gefühl für die vorhandenen Kräfte und Leistungen zu bekommen. Dafür wird ein 1:1 Wascharm-Modell verwendet, das zum grössten Teil aus Kunststoff-3D-Druckteilen besteht. Damit das Wascharm-Modell über dieselbe Massenträgheit, wie der originale Wascharm verfügt, werden erste Berechnungen durchgeführt. Mit Hilfe dieser Berechnungen wird der nachgebaute Wascharm mit einem definierten Gewicht an einer definierten Stelle ballastiert.

Für die Vorversuche werden die vier Lösungskombinationen aus dem Kapitel 10 «Lösungskombinationen» verwendet. Diese sind:

- Pneumatik Motor

- Wasserrad ohne Übersetzung
- Wasserrad mit Übersetzung
- Elektromotor (Schrittmotor)

Dabei wird das «Wasserrad ohne Übersetzung» noch in zwei weitere Versuche aufgeteilt:

- Wasserrad ohne Übersetzung und mit Gehäuse
- Wasserrad ohne Übersetzung und ohne Gehäuse

11.1 Erste Berechnungen zu den Vorversuchen

Die Berechnung des Antriebsmomentes und der Antriebsleistung basieren auf der Beschleunigung des Wascharmes auf die geforderte Drehzahl von maximal 45 U/min. Das für diese Berechnung benötigte Massenträgheitsmoment wird im folgenden Kapitel berechnet. Bei den Berechnungen wird von idealen Bauteilen und einer reibungsfreien Lagerung ausgegangen.

11.1.1 Massenträgheitsmoment

In diesem Kapitel wird das Massenträgheitsmoment des realen Wascharmes mit einen Aussendurchmesser von ungefähr 57.6 cm berechnet. Aus diesen Daten wird ein nachgebauter Wascharm aus Kunststoff für Versuche verwendet. Dieser wird soweit aufballastiert, bis er dasselbe Massenträgheitsmoment aufweist, wie das Original. Dadurch können realitätsnahe Versuche durchgeführt werden.

Die einzelnen Massenträgheitsmomente der verschiedenen Bauteile des originalen Reinigungsarmes werden aus den CAD-Daten verwendet. Anschliessend wird bei den Teilen, die ausserhalb der Drehachse montiert sind, der Steiner-Anteil hinzu addiert. Die Summe der einzelnen Massenträgheitsmomente ergibt schlussendlich das gesamte Massenträgheitsmoment des Reinigungsarmes. Die Berechnung wird im Excel durchgeführt. Nachfolgend sind die verwendeten Formeln aufgeführt, die bei der Berechnung verwendet werden.

$$J_{ges} = Gesamtes\ Massenträgheitsmoment\ [kgm^2]$$

$$J = Massenträgheitsmoment\ um\ den\ Schwerpunkt\ [kgm^2]$$

$$m = Masse\ des\ Bauteils\ [kg]$$

$$l = Abstand\ des\ Schwerpunktes\ zur\ Drehachse\ [m]$$

$$J_{ges} = J + m \cdot l^2$$

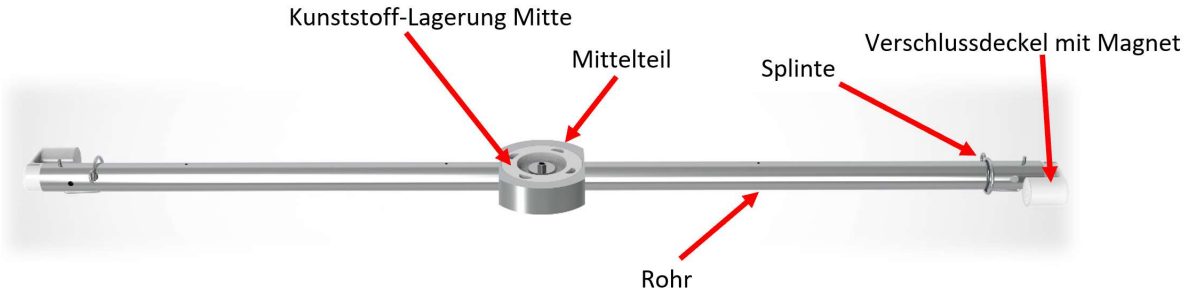


Abbildung 3: Bauteile des Wascharmes

Tabelle 5: Berechnung Massenträgheit des originalen Wascharmes

Original

Bauteil	Anzahl	Gewicht [kg]	Abstand zum Drehpunkt [m]	Massenträgheit um den Schwerpunkt [kgm^2]	Steiner-Anteil [kgm^2]	Massenträgheit gesamt [kgm^2]
Magnet	6	3.07E-03	2.76E-01	3.30E-08	2.34E-04	1.41E-03
Deckel Magnet	2	5.38E-04	2.66E-01	9.02E-09	3.82E-05	7.64E-05
Verschlussdeckel	2	7.36E-03	2.84E-01	1.12E-06	5.92E-04	1.19E-03
Splinte	2	1.98E-03	2.51E-01	2.24E-07	1.24E-04	2.49E-04
Kunststoff-Lagerung Mitte	1	1.29E-02	0.00E+00	2.37E-06	0.00E+00	2.37E-06
Rohr 1	1	9.27E-02	1.54E-01	4.85E-04	2.19E-03	2.68E-03
Mittelteil	1	1.50E-01	0.00E+00	9.24E-05	0.00E+00	9.24E-05
Rohr 2	1	9.27E-02	1.54E-01	4.85E-04	2.19E-03	2.68E-03
Kunststoffscheibe	1	2.75E-04	0.00E+00	8.67E-09	0.00E+00	8.67E-09
Wassersäule	2	4.40E-02	1.43E-01	3.00E-04	9.01E-04	2.40E-03
					Summe	**1.08E-02**

Der zu Versuchszwecken gebaute Wascharm besteht vorwiegend aus Polylactide (PLA) 3D-Druckteilen. PLA ist ein Kunststoff, der sich für den 3D-Druck sehr gut eignet. Er besitzt einen Schmelzpunkt zwischen 190 und 210 °C und eine Dichte von 1.21-1.45 g/cm^3 (Filamentworld, 2021). Aus diesem Grund ist der nachgebaute Wascharm leichter als der grösstenteils aus Edelstahl gebaute Originalwascharm. Für die Anpassung des Massenträgheitsmomentes stehen zwei zylinderförmige Stahlgewichte mit einer Masse von jeweils 121 Gramm zur Verfügung. Nachfolgend wird der Abstand dieser beiden Gewichte zur Drehachse am Nachbauwascharm berechnet und durch eine Excel-Berechnung validiert.

$$J_{ges} = Gesamtes\ Massenträgheitsmoment\ [kgm^2]$$

$$J = Massenträgheitsmoment\ eines\ Zusatzgewichtes\ um\ den\ Schwerpunkt\ [kgm^2]$$

$$J_{NB} = Massenträgheitsmoment\ des\ Nachbauwascharmes\ [kgm^2]$$

$$m = Masse\ eines\ Zusatzgewichtes\ [kg]$$

$$l = Abstand\ des\ Schwerpunktes\ zur\ Drehachse\ [m]$$

$$J_{ges} = J_{NB} + 2J + 2m \cdot l^2$$

$$l = \sqrt{\frac{J_{ges} - J_{NB} - 2J}{2m}} = \sqrt{\frac{0.010766 - 0.005688 - 2 * 0.000024}{2 * 0.121}} = \underline{\underline{0.149\ m}}$$

Tabelle 6: Berechnung Massenträgheit des Wascharm-Modells

Modell

Bauteil	Anzahl	Gewicht [kg]	Abstand zum Drehpunkt [m]	Massenträgheit um den Schwerpunkt [kgm^2]	Steiner-Anteil [kgm^2]	Massenträgheit gesamt [kgm^2]
Magnet	0	3.07E-03	2.76E-01	3.30E-08	2.34E-04	0.00E+00
Deckel Magnet	0	5.38E-04	2.66E-01	9.02E-09	3.82E-05	0.00E+00
Verschlussdeckel	2	1.00E-02	2.84E-01	1.52E-06	8.04E-04	1.61E-03
Splinte	2	1.00E-03	2.51E-01	0.00E+00	6.29E-05	1.26E-04
Kunststoff-Lagerung Mitte	1	9.00E-03	0.00E+00	1.65E-06	0.00E+00	1.65E-06
Rohr 1	1	2.10E-02	1.54E-01	1.10E-04	4.96E-04	6.06E-04
Mittelteil	1	2.30E-02	0.00E+00	1.42E-05	0.00E+00	1.42E-05
Rohr 2	1	2.10E-02	1.54E-01	1.10E-04	4.96E-04	6.06E-04
Kunststoffscheibe	0	2.75E-04	0.00E+00	8.67E-09	0.00E+00	0.00E+00
Wassersäule	2	4.40E-02	1.43E-01	3.00E-04	9.01E-04	2.40E-03
Zusatzgewicht	2	1.21E-01	1.49E-01	2.42E-05	2.68E-03	5.40E-03
					Summe	**1.08E-02**

Durch die Validierung mit der Excel-Tabelle wird bestätigt, dass mit den Zusatzgewichten dasselbe Massenträgheitsmoment wie beim originalen Wascharm erreicht wird, wenn diese mit einem Abstand von 0.149 m vom Drehpunkt montiert werden.

11.1.2 Antriebsmoment durch Trägheit

Aus dem Anforderungskatalog ist eine Drehzahl des Waschармes von maximal 45 U/min vorgegeben. Eine Regelzeit von höchstens 10 Sekunden ist ausserdem vorgegeben. Aus diesen beiden Angaben kann die maximale Beschleunigung berechnet werden. Aus der Beschleunigung und dem Massenträgheitsmoment aus Kapitel 11.1.1 kann das notwendige Antriebsdrehmoment berechnet werden. Um die maximale Regelzeit nicht komplett ausnützen zu müssen wird eine Sicherheit von 2 eingerechnet, so beträgt die Regelzeit theoretisch 5 Sekunden.

$$\omega = Winkelgeschwindigkeit\ \left[\frac{rad}{s}\right]$$

$$\alpha = Winkelbeschleunigung\ \left[\frac{rad}{s^2}\right]$$

$$M = Antriebsdrehmoment\ [Nm]$$

$$n = Drehzahl\ \left[\frac{U}{min}\right]$$

$$S = Sicherheit$$

$$t = Beschleunigungszeit\ [s]$$

$$n = 45\frac{U}{min}$$

$$S = 2$$

$$t = 10\,s$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 45}{60} = 4.71\frac{rad}{s}$$

$$\alpha = \frac{S \cdot \omega}{t} = \frac{2 \cdot 4.71}{10} = 0.94\frac{rad}{s^2}$$

$$M = J_{ges} \cdot \alpha = 1{,}08 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}94 = \underline{\underline{10{,}15 \cdot 10^{-3} Nm}}$$

Das berechnete Antriebsmoment für die Beschleunigung des Wascharmes von 0 auf 45 U/min in 5 Sekunden beträgt 0.01 Nm. Diese Berechnung setzt eine reibungsfreie Lagerung des Wascharmes voraus.

11.1.3 Antriebsleistung durch Trägheit

Die Antriebsleistung, die benötigt wird um den Wascharm in der vorgegebenen Zeit von 5 Sekunden (wenn die Sicherheit von 2 weiter verwendet wird) auf die Drehzahl von 45 U/min zu beschleunigen, wird in diesem Kapitel berechnet. Bei dieser Antriebsleistung wird der zusätzliche Widerstand durch Reibung in der Lagerung nicht berücksichtigt. Um die Leistung berechnen zu können, wird das Antriebsmoment und die maximale Kreisfrequenz benötigt.

$$M = Antriebsdrehmoment\ [Nm]$$

$$\omega = Winkelgeschwindigkeit\ \left[\frac{rad}{s}\right]$$

$$P = Antriebsleistung\ [W]$$

$$M = 10.15 * 10^{-3}\ Nm$$

$$\omega = 4.71 \frac{rad}{s}$$

$$P = M * \omega = 10.15 * 10^{-3} * 4.71 = \underline{\underline{4.78 * 10^{-2} W}}$$

Für die Beschleunigung des Wascharmes auf die vorgegebene Maximaldrehzahl von 45 U/min wird eine Antriebsleistung von 0.048 W benötigt.

11.2 Durchführung Vorversuche

In diesem Kapitel werden die Vorversuche beschrieben. Sie werden mit dem Modell-Wascharm durchgeführt, der über dieselbe Massenträgheit wie der originale Wascharm verfügt. Dabei steht das abschätzen des dynamischen Verhaltens und das Verhalten bei äusseren Störeinflüssen im Vordergrund. Ein Ziel ist ausserdem, Vor- und Nachteile der einzelnen Systeme herauszufinden, die in der Theorie nicht ersichtlich sind. Die ausführlichen Informationen und Ergebnisse zu den Versuchen sind im Anhang Kapitel 4 «Vorversuche» zu finden.

11.2.1 Pneumatik Motor (Lamellenmotor)

Der Versuch mit einem Pneumatik Motor als Antriebseinheit wird mit einem Luftschleifer durchgeführt. Dabei wird der Schleifkopf durch eine Schaftschraube ersetzt. Die Antriebsenergie wird mit einem Gummiband realisiert, das als Riementrieb funktioniert (siehe Abbildung 4 «Vorversuch Pneumatik Motor). Die Drehzahl des Luftschleifers wird am Handregler eingestellt. Aufgrund der nur einseitig möglichen Drehrichtung des Luftschleifers kann ein Ändern der Drehrichtung nicht getestet werden. Die Störung wird durch ein Bremsmoment simuliert, das mit der Hand auf das Drehteil des Wascharmes gebracht wird.

Abbildung 4: Vorversuch Pneumatik Motor

Der Antrieb mit dem Pneumatik Motor funktioniert sehr gut. Der Motor hat ein genügend hohes Drehmoment, um den Wascharm in geringer Zeit auf die gewünschte Drehzahl zu beschleunigen und Störeinflüsse durch das Bremsmoment verschwindend klein zu machen. Der optimale Drehzahlbereich des Luftschleifers von rund 20'000 U/min ist allerdings viel zu hoch für den Antrieb eines Waschармes. Dafür wäre eine sehr grosse Übersetzung nötig. Der in der Anforderungsliste geforderte Temperaturbereich von 15-120 °C stellt zudem ein grosses Problem dar. Auf dem Markt sind keine Druckluftmotoren für Temperaturen bis 120 °C zu finden.

11.2.2 Wasserrad ohne Übersetzung

Eine Lösungskombination sieht den Antrieb des Waschармes mit einem direkt montieren Wasserrad vor. Dabei gibt es zwei Varianten, wie dieses realisiert werden kann. Eine Variante ist, das Wasserrad offen zu montieren. Dabei spritzen Wasserdüsen auf die Schaufeln des Rades und treiben es an. Die andere Variante für den Antrieb mit einem Wasserrad ist die Kapselung des Wasserrades in einem Gehäuse. Dabei kann das Wasser tangential durch das runde Gehäuse fliessen und treibt so das darin liegende Wasserrad an. Um das Störverhalten zu beobachten wird eine Störung von aussen mit Wasser aus einer Giesskanne simuliert. Diese beiden Varianten werden nachfolgend genauer erklärt.

11.2.2.1 Ohne Gehäuse

Das Wasserrad ohne Gehäuse ist freiliegend und fest mit dem Wascharm verbunden. Angetrieben wird es durch einen Wasserstrahl, der in einer Düse beschleunigt wird. Das Wasser aus der Düse trifft dabei auf die Schaufeln des Wasserrades und bringt dieses mitsamt dem Wascharm in Bewegung. Die Schaufeln des Wasserrades haben eine ähnliche Form, wie diese eines Peltonbechers und sorgen für eine Erhöhung der Effizienz (Solarenergie, 2021). Das Wasserrad hat bei einem ersten Versuchsdurchgang einen Aussendurchmesser von 80 mm. In einem zweiten Versuch wird der Aussendurchmesser auf 160 mm verdoppelt. Die Wasserdüse besitzt einen Öffnungsdurchmesser von 2 mm. Für eine Änderung der Drehrichtung wird der Anströmwinkel der Wasserdüse auf die andere Seite der Wasserradschaufeln geändert. Der Wasserdruck beträgt bei diesem Versuch 0.8 bar. Daraus ergibt sich ein Volumenstrom von rund 1.96 l/min.

Abbildung 5: Vorversuch Wasserrad ohne Gehäuse und ohne Übersetzung

Der Antrieb mit dem Wasserrad ohne Gehäuse funktioniert gut. Das Antriebswasser spritzt beim Auftreffen auf die Schaufeln des Wasserrades in alle Richtungen. Dies wirkt unterstützend für den Reinigungsprozess der Anlage. Eine Drehrichtungsänderung ist sehr einfach durch umschwenken der Wasserdüse möglich. Da mit dem Wasserrad ein kleines Antriebsmoment erzeugt werden kann, ist die Beschleunigung träge und Störungen von aussen haben einen grossen Einfluss auf die Drehzahl des Wascharmes. Mit dem Wasser aus der Giesskanne kann die Störung so gross werden, dass der Wascharm beim Antrieb durch das 160 mm Wasserrad bis zum Stillstand abgebremst wird.

Bei einem dritten Versuchsdurchlauf wird das Wasserrad durch einen Deckel von oben vor dem Wasser der äusseren Störung (Giesskanne) abgeschirmt. Dies bringt den Effekt, dass das Wasserrad bei gleichen Versuchsbedingungen nicht ganz zum Stillstand kommt. Somit hat eine Abschirmung des Wasserrades einen positiven Einfluss auf die Störungsresistenz des Wasserradantriebes.

11.2.2.2 Mit Gehäuse

Um das Wasserrad vor äusseren Einflüssen zu schützen, kann es in einem Gehäuse untergebracht werden. Bei diesem Versuch wird das Wasserrad, das einen Aussendurchmesser von 80 mm hat, in einem runden 3D-gedruckten Kunststoffgehäuse untergebracht. Zwischen den beweglichen und ruhenden Bauteilen werden keine Dichtungen verwendet. Anstelle von Dichtungen werden die Teile mit einem kleinstmöglichen Spaltmass konstruiert. Die Wasserzufuhr gelangt über eine Rohrleitung zum Gehäuse. Das Wasser strömt dabei tangential durch das runde Gehäuse und tritt bei der Auslassöffnung heraus. Von dieser Auslassöffnung her kann das Wasser zurück in einen Tank geführt werden. Für die Drehrichtungsänderung werden Zu- und Abfuhr des Wassers getauscht. So wird das Wasserrad von der anderen Seite angeströmt und der Wascharm dreht sich in die entgegengesetzte Richtung.

Abbildung 6: Vorversuch Wasserrad mit Gehäuse und ohne Übersetzung

Der Antrieb mit dem gekapselten Wasserrad funktioniert grundsätzlich. Die erhöhte Reibung aufgrund von Fertigungstoleranzen und einer grösseren Anzahl Bauteile hat jedoch eine instabile Betriebsdrehzahl zur Folge. Bei einem zweiten Durchgang des Versuches war die innere Reibung des Antriebs so gross, dass der Wascharm nicht ohne fremde Hilfe drehte. Dadurch kann der Einfluss von äusseren Störungen nicht beurteilt werden. Aufgrund von Spaltströmungen zwischen den beweglichen Teilen entstehen grosse Leckage-Verluste. Dies erfordert einen sehr grossen Volumenstrom des Antriebswassers und macht diesen Antrieb sehr ineffizient und ungeeignet für diese Anwendung.

11.2.3 Wasserrad mit Übersetzung ohne Gehäuse

Um das Antriebsmoment des Wasserrades zu erhöhen, kann es mit einem Getriebe übersetzt werden. Bei diesem Versuch beträgt die Getriebeübersetzung 4:1. Diess bedeutet, dass das Wasserrad mit der vierfachen Geschwindigkeit des Wascharmes dreht. Dadurch kann das Antriebsmoment des Wasserrades um das Vierfache vergrössert werden. Dieses grössere Drehmoment sorgt für eine grössere Beschleunigung des Wascharmes auf die Solldrehzahl und eine kleinere Anfälligkeit auf äussere Einflüsse. Das grosse Zahnrad wird fest mit dem Wascharm verbunden, das kleine mit dem Wasserrad. Das Wasserrad hat einen Aussendurchmesser von 60 mm. Die Störung wird bei diesem Versuch wieder mit Wasser aus einer Giesskanne simuliert.

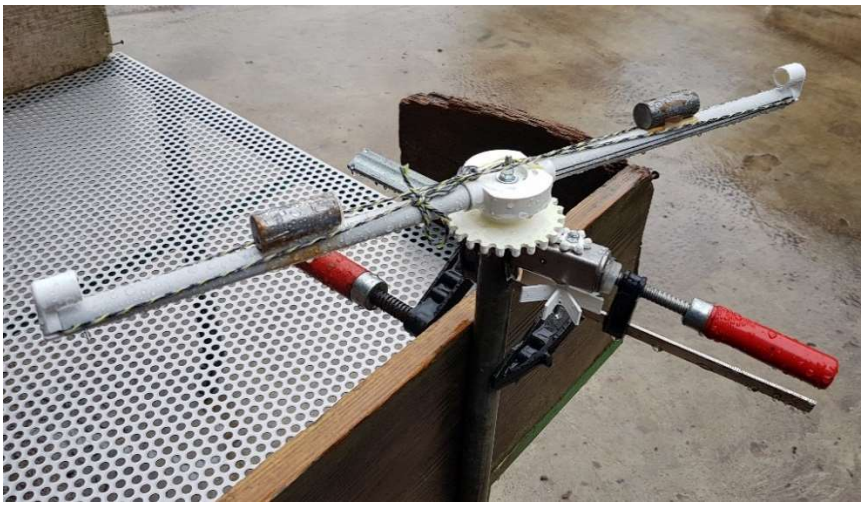


Abbildung 7: Vorversuch Wasserrad mit Übersetzung

Der Antrieb mit dem Wasserrad, das durch ein Getriebe untersetzt ist, funktioniert sehr gut. Es ist ein deutlicher Unterschied des Antriebsmomentes gegenüber dem direkt montierten Wasserrad zu spüren, obwohl das direkt montierte Wasserrad einen um 100 mm grösseren Durchmesser hat. Der Wascharm dreht mit einer stabilen Drehzahl. Das Wasser für den Antrieb spritzt beim Auftreffen auf die Schaufeln des Wasserrades umher. Dieser Effekt hat eine unterstützende Wirkung für den Reinigungsprozess. Die Störung des Wassers aus der Giesskanne bringt den Wascharm zu einer kleineren Drehzahl. Der Wascharm kann jedoch durch die Störung nicht zum Anhalten gebracht werden. Durch eine optimierte Geometrie der Wasserradschaufeln könnte die Antriebsleistung bei gleichem Wasservolumenstrom verbessert werden, was die Störanfälligkeit weiter reduzieren würde.

Bei einem zweiten Versuchsdurchgang wird die Getriebeübersetzung auf 8:1 verdoppelt (siehe Abbildung 7 «Vorversuch Wasserrad mit Übersetzung»). Dadurch verdoppelt sich das Antriebsmoment des Wasserrades noch einmal. Dies hat zur Folge, dass die Drehzahl des Wascharmes bei Störeinflüssen durch Wasser aus der Giesskanne weniger stark beeinflusst wird. Eine weitere Effizienzverbesserung könnten zudem Peltonbecher am Wasserrad bringen, bei denen der Wasserstrahl um nahezu 180° umgelenkt wird (Solarenergie, 2021).

11.2.4 Elektromotor (Schrittmotor)

Damit das dynamische- und das Störverhalten des Wascharmes beim Antrieb durch einen elektrischen Schrittmotor beobachtet und abgeschätzt werden kann, wird dieser Versuch durchgeführt. Dafür wird ein Schrittmotor des Herstellers «Hetai Motor» mit dem Typ 42BTGHW811 verwendet. Angesteuert wird er durch einen Schrittmotorentreiber des Typs DRV8825, der wiederum Steuersignale von einem Arduino UNO Microcontroller erhält. Die Datenblätter zum Schrittmotor, dem Schrittmotorentreiber und dem Arduino UNO Board sind im Anhang Kapitel 5 «Datenblätter» zu finden. In Abbildung 8

«Anschlussschema Schrittmotor» ist zu erkennen, wie die einzelnen Komponenten miteinander verbunden sind. Für die Übertragung der Antriebsenergie vom Schrittmotor auf den Wascharm wird ein Gummiband verwendet, das als Riementrieb mit Übersetzung funktioniert (siehe Abbildung 9 «Versuchsaufbau Schrittmotor»). Die Drehzahl des Schrittmotors wird so programmiert, dass der Wascharm mit einer Drehzahl von ca. 27 U/min dreht. Der Störeinfluss wird von Hand mit einem Bremsmoment auf das Drehteil des Wascharms gebracht. Der Betrag dieses Bremsmomentes kann nur schwer beziffert werden. Es geht vorwiegend darum, die Reaktion des Systems auf äussere Störungen zu beobachten.

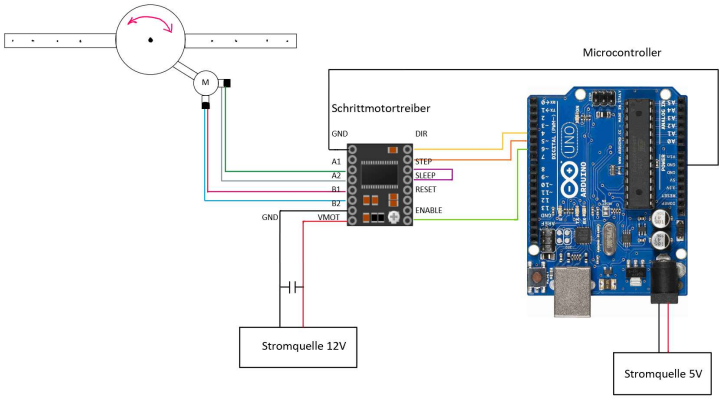


Abbildung 8: Anschlussschema Schrittmotor

Abbildung 9: Versuchsaufbau Schrittmotor

Bei dem Versuch stellte sich heraus, dass der Antrieb mit einem Schrittmotor sehr gut funktioniert. Auch das Antriebsmoment des Motors von 0.0275 Nm (siehe Anhang Kapitel 5.1 «Schrittmotor») reicht gut, um Störeinflüssen problemlos entgegen zu wirken. Beim Anfahren und Abbremsen fällt allerdings auf, dass das Antriebsmoment zu gross ist und der Gummiband-Riementrieb schleift. Abhilfe könnte hier ein programmiertes sanft Anlaufen und Abbremsen schaffen. Der Schrittmotor dreht mit einer konstanten Drehzahl und erzeugt dabei ein hohes Drehmoment. Dies sind grosse Vorteile für den Antrieb des Waschermes. Probleme schaffen jedoch die Temperaturfestigkeit und die Wasserverträglichkeit. Bei Recherchen wurde ein einziger Schrittmotor gefunden, der eine Temperatur von bis zu

180 °C erträgt (Caribou, 2021). Dieser ist allerding nicht feuchtigkeitsresistent. Umgekehrt gibt es wasserbeständige Schrittmotoren, die jedoch nicht für Temperaturen bis 120 °C zugelassen sind. Aus diesem Grund wird diese Antriebsform nicht weiter verfolgt.

11.3 Resultate aus den Vorversuchen

Aus den durchgeführten Vorversuchen haben sich einige Antriebsvarianten als besser und andere als weniger gut geeignet gezeigt. In der folgenden Tabelle 7 «Resultate Vorversuche»Tabelle 1 sind die Resultate übersichtlich dargestellt. Daraus wird in Kombination mit der Nutzwertanalyse das beste System ausgewählt und weiter ausgearbeitet.

Tabelle 7: Resultate Vorversuche

Antriebssystem	Vorteile	Nachteile
Pneumatik Motor	• Betrieb in nasser Umgebung möglich	• Hohe Geräuschentwicklung • Sehr grosse Übersetzung nötig • Zu hohe Umgebungstemperaturen
Wasserrad ohne Übersetzung ohne Gehäuse	• Sehr wenig bewegliche Teile	• Kleines Antriebsmoment • Grosse Störeinflüsse
Wasserrad ohne Übersetzung mit Gehäuse	• Antrieb vor äusseren Einflüssen geschützt	• Sehr grosse Reibungsverluste • Hohe Leckageverluste
Wasserrad mit Übersetzung ohne Gehäuse	• Hohes Antriebsmoment möglich • Kleine Störeinflüsse	• Durch Getriebe mehr bewegliche Teile als ohne Übersetzung
Elektromotor Schrittmotor	• Hohes Antriebsmoment • Kleine Störeinflüsse • Einfache Regelung möglich	• Hohe Umgebungstemperaturen • Feuchtigkeitsbeständigkeit

Bei den Vorversuchen hat sich gezeigt, dass sich ein Antrieb des Wascharmes durch ein Wasserrad mit Übersetzung und ohne Gehäuse (in Tabelle 7 «Resultate Vorversuche» blau markiert) am besten eignet.

11.4 Volumenstrommessung

Um Berechnungen bezüglich des Antriebes mit Wasser machen zu können, werden Volumenstrommessungen mit zwei unterschiedlichen Düsen durchgeführt. Diese Düsen wurden mit einem 3D-

Drucker aus Kunststoff hergestellt. Die eine Düse hat einen Öffnungsdurchmesser von 2 mm und die andere 3 mm. Ziel dieser Messungen ist es, die Volumenströme im Arbeitsbereich zwischen 0.8 und 1.7 bar durch die entsprechenden Düsen bestimmen zu können. Die 2 mm Düse wird für die Versuche mit den Wasserrädern benötigt und zwei 3 mm Düsen werden am bestehenden Wascharm für dessen Antrieb verwendet. Mit den gemessenen Volumenströmen können weiterführende Antriebsberechnungen durchgeführt werden. Bei den Messungen werden ein analoges Manometer mit Druckbereich zwischen 0 und 4 bar und einer Auflösung von 0.02 bar, sowie ein digitales Volumenstrommessgerät mit Messbereich zwischen 0.04 und 10 l/min verwendet. Das Volumenstrommessgerät mit dem Typ MIM-1205HG4C3T0 stammt vom Hersteller Kobold (Kobold, 2021). Genauere Angaben zum Messgerät sind im Anhang Kapitel 5.4 «Durchflussmessgerät» zu finden. Mit Hilfe eines Drehhahns wird der gewünschte Druck eingestellt und der sich dadurch einstellende Volumenstrom abgelesen. Bei der Messung der 3 mm Düse zeigte sich ab einem Wasserdruck von 1.4 bar eine schlagartige Abnahme des Volumenstromes. Dieser Effekt ist auf die nicht strömungsoptimierte Form der Düse zurückzuführen. Ab 1.4 bar entstehen im Inneren der Düsen vermutlich Wirbel, die einen sehr hohen Verlust bewirken. Aus diesem Grund werden die Messungen nur bis zu einem Wasserdruck von 1.4 bar durchgeführt. Die restlichen Werte werden mithilfe einer Trendformel aus dem Excel rechnerisch bestimmt. Diese Werte sind in der Grafik in Abbildung 10 «Messung Volumenstrom 2 mm und 3 mm Düse» grau eingefärbt.

Düse 2mm

Druck [bar]	Volumenstrom [l/min]
0.1	0.62
0.2	0.93
0.3	1.19
0.4	1.4
0.5	1.55
0.6	1.7
0.7	1.85
0.8	1.96
0.9	2.08
1	2.2
1.1	2.31
1.2	2.42
1.3	2.5
1.4	2.61
1.5	2.7
1.6	2.77
1.7	2.85
1.8	2.94
1.9	3.01
2	3.08

Düse 3mm

Druck [bar]	Volumenstrom [l/min]
0.1	1.83
0.2	2.33
0.3	2.87
0.4	3.32
0.5	3.7
0.6	4.05
0.7	4.38
0.8	4.67
0.9	4.96
1	5.22
1.1	5.48
1.2	5.72
1.3	5.94
1.4	6.17
1.5	6.39
1.6	6.60
1.7	6.81
1.8	7.00
1.9	7.20
2	7.38

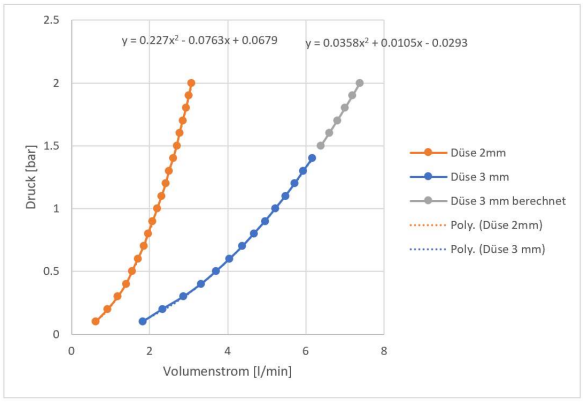


Abbildung 10: Messung Volumenstrom 2 mm und 3 mm Düse

Mit diesen Messungen lässt sich erkennen, dass im Vergleich zur 2mm Düse ein deutlich grösserer Volumenstrom bei gleichem Druck durch die 3 mm Düse fliesst.

11.5 Berechnung effektive Antriebsleistung

Um bei der Auslegung der Antriebsleistung mit realen Werten rechnen zu können, wird die Leistung der Antriebsbohrungen verwendet, die bei den Waschармen bis anhin vorhanden sind. Ein Wascharm

besitzt pro Seite eine Antriebsbohrung (siehe Abbildung 11 «Bohrungen und Wasserfluss am Wascharm»). Diese haben einen Bohrungsdurchmesser von 3 mm. Der Abstand zum Drehpunkt beträgt jeweils 261.75 mm. Für die Berechnungen werden die Volumenstrommessungen des vorherigen Kapitels verwendet.

Es werden zwei Betriebszustände rechnerisch betrachtet: Der eine ist der Antrieb bei einem maximalen Wasserdruck von 1.7 bar. Dieser erzeugt das maximale Antriebsmoment und die maximale Leistung. Der zweite Betriebszustand liegt bei einem Wasserdruck von 0.8 bar. Dies ist der minimal vorhandene Arbeitsdruck der Reinigungsanlage. Die Berechnungen basieren auf dem Impulssatz. Die Antriebskraft entsteht aufgrund des Rückstosses durch den Geschwindigkeitsunterschied des austretenden Wassers vor und nach der Antriebsdüse.

Das Wasser strömt von der Unterseite durch die ringförmige Öffnung (hellblauer grosser Pfeil in Abbildung 11 «Bohrungen und Wasserfluss am Wascharm») und verteilt sich gleichmässig in die beiden Arme. Das Wasser tritt durch die Reinigungsbohrungen, die Antriebsbohrung und den Reinigungsschlitz aussen an den Armen aus.

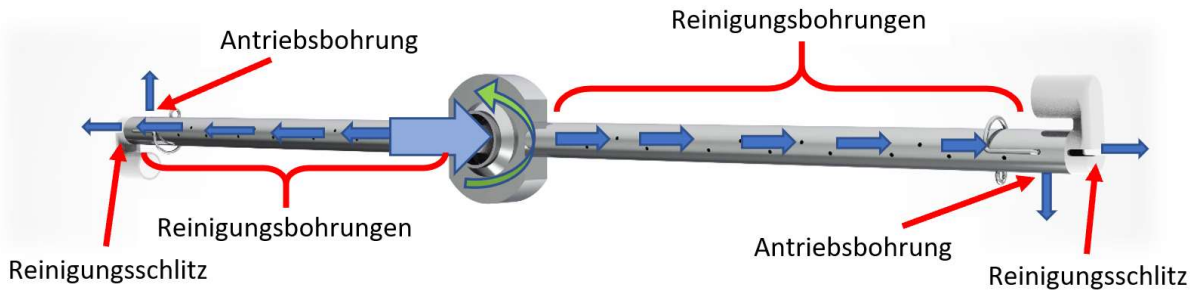


Abbildung 11: Bohrungen und Wasserfluss am Wascharm

Für die Berechnungen werden folgende Annahmen getroffen:

- Der maximale Volumenstrom von 5000 l/h laut Anforderungsliste teilt sich in beide Armhälften gleichmässig auf
- Auf der Innenseite des Rohres bei den Antriebsbohrungen herrscht aufgrund von Wasseraustritt durch die Reinigungsbohrungen noch die halbe Strömungsgeschwindigkeit

Bei den folgenden Berechnungen liegt der Betriebsdruck bei 1.7 bar:

$$\dot{V}_{ges} = Gesamtvolumenstrom\ des\ Reinigungswassers\ \left[\frac{m^3}{s}\right]$$

$$\dot{V} = Volumenstrom\ durch\ die\ Antriebsdüse\ \left[\frac{m^3}{s}\right]$$

$$\rho = Dichte\ Wasser\ \left[\frac{kg}{m^3}\right]$$

$$d = Antriebsdüsen\ Öffnungsdurchmesser\ [m]$$

$$D = Rohrinnendurchmesser\ [m]$$

$$v_1 = Strömungsgeschwindigkeit\ im\ Rohr\ bei\ Antriebsdüse\ \left[\frac{m}{s}\right]$$

$$v_2 = Strömungsgeschwindigkeit\ Düsenaustritt\ \left[\frac{m}{s}\right]$$

$$\dot{m} = Massenstrom\ durch\ die\ Antriebsdüse\ \left[\frac{kg}{s}\right]$$

$$F = Antriebskraft\ pro\ Antriebsbohrung\ [N]$$

$$l = Abstand\ Drehpunkt - Antriebsbohrung\ [m]$$

$$n_{max} = Maximale\ Drehzahl\ des\ Wascharmes\ [\frac{U}{min}]$$

$$z = Anzahl\ Antriebsdüsen\ [-]$$

$$M = Gesamtantriebsmoment\ [Nm]$$

$$P = Antriebsleistung\ [W]$$

$$\dot{V}_{ges} = 5\frac{m^3}{h} = 0.00139\frac{m^3}{s}$$

$$\dot{V} = 6.81\frac{l}{min} = 1.135\ * 10^{-4}\ m^3/s$$

$$\rho = 1000\ kg/m^3$$

$$d = 3\ mm = 0.003\ m$$

$$D = 14\ mm = 0.014\ m$$

$$l = 0.26175\ m$$

$$n_{max} = 45\ U/min$$

$$z = 2$$

$$v_1 = \frac{\dot{V}_{ges}}{2 * A * 2} = \frac{0.00139 * 4}{2 * 0.014^2 * \pi * 2} = 2.26 \frac{m}{s}$$

$$v_2 = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{1.135 * 10^{-4} * 4}{0.003^2 * \pi} = 16.06 \frac{m}{s}$$

$$\dot{m} = \rho * \dot{V} = 1000 * 1.135 * 10^{-4} = 0.1135 \frac{kg}{s}$$

$$F = \dot{m} * (v_2 - v_1) = 0.1135 * (16.06 - 2.26) = 1.57\ N$$

$$M = z * F * l = 2 * 1.57 * 0.26175 = \underline{\underline{0.82\ Nm}}$$

$$P = M * 2 * \pi * \frac{n_{max}}{60} = 0.82 * 2 * \pi * \frac{45}{60} = \underline{\underline{3.86W}}$$

Das grösste vorhandene Antriebsmoment eines Wascharmes beträgt bei einem Wasserdruck von 1.7 bar ungefähr 0.82 Nm. Der neue Antrieb des Wascharmes sollte daher mindestens über dieses Antriebsmoment verfügen, um ihn zuverlässig antreiben zu können. Die maximale Antriebsleistung des bestehenden Wascharmes beträgt daher 3.86 W bei einer Drehzahl von 45 U/min.

Das kleinstmögliche Antriebsmoment des Wascharmes mit Antriebsbohrungen liegt bei einem Wasserdruck von 0.8 bar. Dieses Moment wird nachfolgend berechnet. Als Vereinfachung wird bei dem Druck von 0.8 bar ein Gesamtvolumenstrom des Reinigungswassers von 70 % des maximalen Volumenstromes bei 1.7 bar, das bedeutet 3500 l/h, angenommen.

$$\dot{V}_{ges} = Gesamtvolumenstrom\ des\ Reinigungswassers\ \left[\frac{m^3}{s}\right]$$

$$\dot{V} = Volumenstrom\ durch\ die\ Antriebsdüse\ \left[\frac{m^3}{s}\right]$$

$$\rho = Dichte\ Wasser\ \left[\frac{kg}{m^3}\right]$$

$$d = Antriebsdüsenöffnungsdurchmesser\ [m]$$

$$D = Rohrinnendurchmesser\ [m]$$

$$v_1 = Strömungsgeschwindigkeit\ im\ Rohr\ bei\ Antriebsdüse\ \left[\frac{m}{s}\right]$$

$$v_2 = Strömungsgeschwindigkeit\ Düsenaustritt\ \left[\frac{m}{s}\right]$$

$$\dot{m} = Massenstrom\ durch\ die\ Antriebsdüse\ \left[\frac{kg}{s}\right]$$

$$F = Antriebskraft\ pro\ Antriebsbohrung\ [N]$$

$$l = Abstand\ Drehpunkt - Antriebsbohrung\ [m]$$

$$n_{min} = minimale\ Drehzahl\ des\ Wascharmes\ [\frac{U}{min}]$$

$$z = Anzahl\ Antriebsdüsen\ [-]$$

$$M = Gesamtantriebsmoment\ [Nm]$$

$$P = Antriebsleistung\ [W]$$

$$\dot{V}_{ges} = 3.5\frac{m^3}{h} = 9.72 * 10^{-4}\frac{m^3}{s}$$

$$\dot{V} = 4.67\frac{l}{min} = 7.78\ * 10^{-5}\ m^3/s$$

$$\rho = 1000\ kg/m^3$$

$$d = 3\ mm = 0.003\ m$$

$$D = 14\ mm = 0.014\ m$$

$$l = 0.26175\ m$$

$$n_{min} = 25\frac{U}{min}$$

$$z = 2$$

$$v_1 = \frac{\dot{V}_{ges}}{A} = \frac{9.72 * 10^{-4} * 4}{2 * 0.014^2 * \pi * 2} = 1.58\frac{m}{s}$$

$$v_2 = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{7.78 * 10^{-5} * 4}{0.003^2 * \pi} = 11.01\frac{m}{s}$$

$$\dot{m} = \rho * \dot{V} = 1000 * 7.78 * 10^{-5} = 0.0778\frac{kg}{s}$$

$$F = \dot{m} * (v_2 - v_1) = 0.0778 * (11.01 - 1.58) = 0.73\ N$$

$$M = z * F * l = 2 * 0.73 * 0.26175 = \underline{\underline{0.38\ Nm}}$$

$$P = M * 2 * \pi * \frac{n_{min}}{60} = 0.38 * 2 * \pi * \frac{25}{60} = \underline{\underline{1.0\ W}}$$

Das Antriebsmoment des neuen Systems muss bei einem minimalen Wasserdruck von 0.8 bar pro Wascharm mindestens 0.38 Nm betragen. Dies entspricht den bereits vorhandenen Betriebsbedingungen. Die kleinstmögliche Antriebsleistung bei einem Druck von 0.8 bar und einer Drehzahl von 25 U/min beträgt 1 W.

Aufgrund dieser Berechnungen muss die Antriebsleistung bei den gegebenen Wasserdrücken mindestens so gross sein, wie bei dem bereits verbauten Antriebssystem. Aus diesem Grund werden diese Werte als Referenzwerte für weitere Berechnungen verwendet.

11.6 Vorauslegung Wasserantrieb

Aus den Vorversuchen und der numerischen Bewertung der Lösungskombinationen geht hervor, dass sich der Antrieb mit Wasser für die vorliegende Problemstellung am besten eignet. Deshalb werden einige Vorauslegungsberechnungen gemacht, um das bestmögliche Antriebskonzept mit Wasser bestimmen zu können. Für diese Berechnungen wird ein Excel-Sheet mit den gemessenen Volumenströmen und weiteren Parametern hinterlegt. Die Berechnungsgrundlage ist der Impuls eines Wasserstrahls einerseits auf eine feste senkrechte Platte und andererseits auf eine feste Halbschale. Damit wird beobachtet, welche Schaufelform beim Wasserrad angestrebt werden soll. Bei den Berechnungen wird der Extremfall vom stehenden Wasserrad betrachtet. Der Wasserstrahl trifft senkrecht auf die Wasserradschaufel. Für die Berechnungen mit einer Getriebeübersetzung wird das Antriebsmoment des Wasserrades durch eine Übersetzung von acht auf das Achtfache erhöht. Die grundlegenden Gleichungen , die bei dieser Berechnung verwendet werden, sind nachfolgend zu sehen.

Grundgleichung Impulskraft

$$F = \dot{m} * (v_2 - v_1)$$

Impulskraft auf feste Platte

$$F = \dot{m} * v_1$$

Impulskraft auf feste Halbschale

$$F = 2 * \dot{m} * v_1$$

In Abbildung 12 «Vorauslegung Wasserrad ohne Getriebe» ist die Berechnung der Antriebsleistung mit dem Excel-Rechner zu sehen. Auf der linken Seite ist die Berechnung des Wasserradantriebes (rot eingekreist) dargestellt. Rechts ist die Berechnung des bestehenden Antriebssystems als Vergleich zu sehen (blau eingekreist). Bei der Auslegung des Wasserrades ohne Getriebe wird der Durchmesser des

Wasserrades mit Halbschalen soweit angepasst, bis ungefähr dieselbe Antriebsleistung wie beim bereits verbauten System erreicht wird. Dies ergibt einen Durchmesser des Wasserrades von ungefähr 575 mm (rot eingekreist). Dieser Durchmesser ist ungefähr gleich gross, wie der des Wascharmes. Ein Durchmesser dieser Grössenordnung ist sehr unpraktikabel, denn die Wasserdüsen müssten noch weiter aussen montiert werden. Dies bräuchte sehr viel Platz und äussere Störungen hätten einen grossen Einfluss auf das dynamische Verhalten des Wascharmes. Die Berechnungen werden mit zwei Düsen pro Drehrichtung und jeweils einem Öffnungsdurchmesser von 2 mm durchgeführt. Dieser Durchmesser wird gewählt, um den Wasserverbrauch des Antriebssystems reduzieren zu können.

Berechnung hydraulische Antriebsleistung mit Wasserrad

Anzahl Düsen	2	-
Düsendurchmesser	2	mm
Volumenstrom durch eine Düse	2.85	l/min
Druck	1.7	bar
Dichte	1000	kg/m³
Durchmesser Wasserrad	575	mm
Getriebeübersetzung	8	-
Drehzahl	45	U/min

Angaben pro Düse

Düsenquerschnitt	3.14159E-06	m²
Wasserstrahlgeschwindigkeit	15.11971959	m/s
Massenstrom	0.0475	kg/s
Hydraulische Leistung	8.075	W

Stehendes Wasserrad

Kraft bei gerader Wasserradschaufel	1.436373361	N			
Antriebsmoment	0.412957341	Nm	Mit Getriebe	3.30365873	Nm
Kraft bei Halbschale	2.872746723	N			
Antriebsmoment	0.825914683	Nm	Mit Getriebe	6.60731746	Nm
Leistung	3.89203125		Leistung	31.13625	W

Berechnete Antriebsleistung aus bestehender Anlage

Anzahl Düsen	2	-
Düsendurchmesser	3	mm
Volumenstrom durch eine Düse	6.81	l/min
Druck	1.7	bar
Dichte	1000	kg/m³
Abstand Düse zum Drehpunkt	261.75	mm

Strömung im Rohrquerschnitt

Volumenstrom durch Hauptleitung	5	m³/h
Rohrinnendurchmesser	14	mm
Strömungsgeschwindigkeit im Rohr	2.25559727	m/s
Hydraulische Leistung	19.295	W

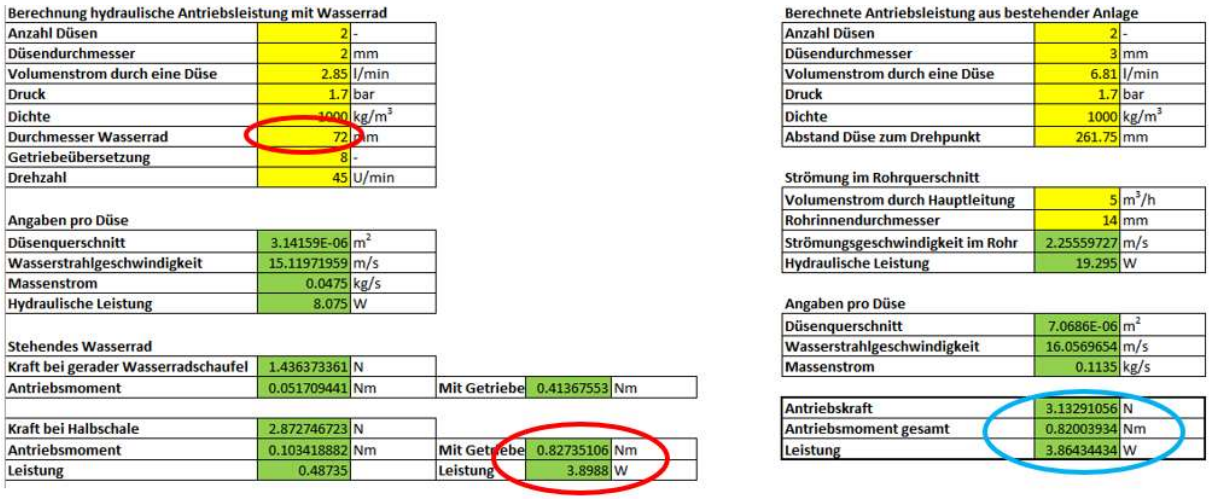
Angaben pro Düse

Düsenquerschnitt	7.0686E-06	m²
Wasserstrahlgeschwindigkeit	16.0569654	m/s
Massenstrom	0.1135	kg/s

Antriebskraft	3.13291056	N
Antriebsmoment gesamt	0.82003934	Nm
Leistung	3.86434434	W

Abbildung 12: Vorauslegung Wasserrad ohne Getriebe

Bei einer weiteren Berechnung mit dem Excel-Rechner wird der ungefähre Durchmesser eines Wasserrades mit Halbschalen und einer Getriebeübersetzung von 8:1 bestimmt (siehe Abbildung 13 «Vorauslegung Wasserrad mit Getriebe»). Die Leistung des Wasserrades entspricht wiederum ungefähr der Leistung des bestehenden Antriebssystems. Bei diesem iterativen Vorgang ergibt sich ein ungefährer Wirkdurchmesser des Wasserrades von 72 mm. Dieser Durchmesser ist etwa achtmal kleiner als dieser vom Wasserrad ohne Getriebe. Die Verkleinerung entspricht dem Übersetzungsverhältnis des Getriebes, was durchaus Sinn ergibt. Diese 72 mm Durchmesser sind konstruktionstechnisch den oben berechneten 575 mm vorzuziehen.



Berechnung hydraulische Antriebsleistung mit Wasserrad		
Anzahl Düsen	2	-
Düsendurchmesser	2	mm
Volumenstrom durch eine Düse	2.85	l/min
Druck	1.7	bar
Dichte	1000	kg/m³
Durchmesser Wasserrad	72	cm
Getriebeübersetzung	8	-
Drehzahl	45	U/min

Angaben pro Düse		
Düsenquerschnitt	3.14159E-06	m²
Wasserstrahlgeschwindigkeit	15.11971959	m/s
Massenstrom	0.0475	kg/s
Hydraulische Leistung	8.075	W

Stehendes Wasserrad				
Kraft bei gerader Wasserradschaufel	1.436373361	N		
Antriebsmoment	0.051709441	Nm	Mit Getriebe	0.41367553 Nm
Kraft bei Halbschale	2.872746723	N		
Antriebsmoment	0.103418882	Nm	Mit Getriebe	0.82735106 Nm
Leistung	0.48735		Leistung	3.8988 W

Berechnete Antriebsleistung aus bestehender Anlage		
Anzahl Düsen	2	-
Düsendurchmesser	3	mm
Volumenstrom durch eine Düse	6.81	l/min
Druck	1.7	bar
Dichte	1000	kg/m³
Abstand Düse zum Drehpunkt	261.75	mm

Strömung im Rohrquerschnitt		
Volumenstrom durch Hauptleitung	5	m³/h
Rohrinnendurchmesser	14	mm
Strömungsgeschwindigkeit im Rohr	2.25559727	m/s
Hydraulische Leistung	19.295	W

Angaben pro Düse		
Düsenquerschnitt	7.0686E-06	m²
Wasserstrahlgeschwindigkeit	16.0569654	m/s
Massenstrom	0.1135	kg/s

Antriebskraft	3.13291056	N
Antriebsmoment gesamt	0.82003934	Nm
Leistung	3.86434434	W

Abbildung 13: Vorauslegung Wasserrad mit Getriebe

Aufgrund der Berechnungen aus der Vorauslegung wird der Antrieb mit einem Wasserrad und einer Getriebeübersetzung entwickelt und gebaut.

12 Lösungskonzept

Die Auswahl des Lösungskonzeptes ist abgeschlossen. In diesem Kapitel werden die einzelnen Komponenten ausgearbeitet. Das Lösungskonzept beinhaltet den Antrieb mit einem Wasserrad, das den Wascharm durch eine Getriebeübersetzung antreibt. Mit dieser Getriebeübersetzung kann das Antriebsmoment des Wasserrades erhöht werden. Der Antrieb kann durch diese Bauart kompakt gebaut werden. In Abbildung 14 «Schema Antriebssystem» ist das geplante Antriebssystem schematisch gezeichnet. Die Drehzahl des Wasserrades wird über die Menge des Antriebswassers (hellblau) festgelegt. Die Wassermenge wird stufenlos über Proportionalventile eingestellt. Pro Drehrichtung des Wasserrades wird dafür eine Wasserzufuhr und ein Ventil benötigt. Für die Verwendung des Antriebssystems bei Waschgutträgern, ist eine Kupplungsstelle schematisch gezeichnet. Die Ventile und somit die Drehzahl des Wascharmes wir über eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) geregelt. In den nachfolgenden Kapiteln werden die nötigen Komponenten ausgelegt. Der Wasserraddurchmesser und die Getriebeübersetzung werden durch einen iterativen Prozess bestimmt. Dokumentiert sind allerdings nur die Endergebnisse.

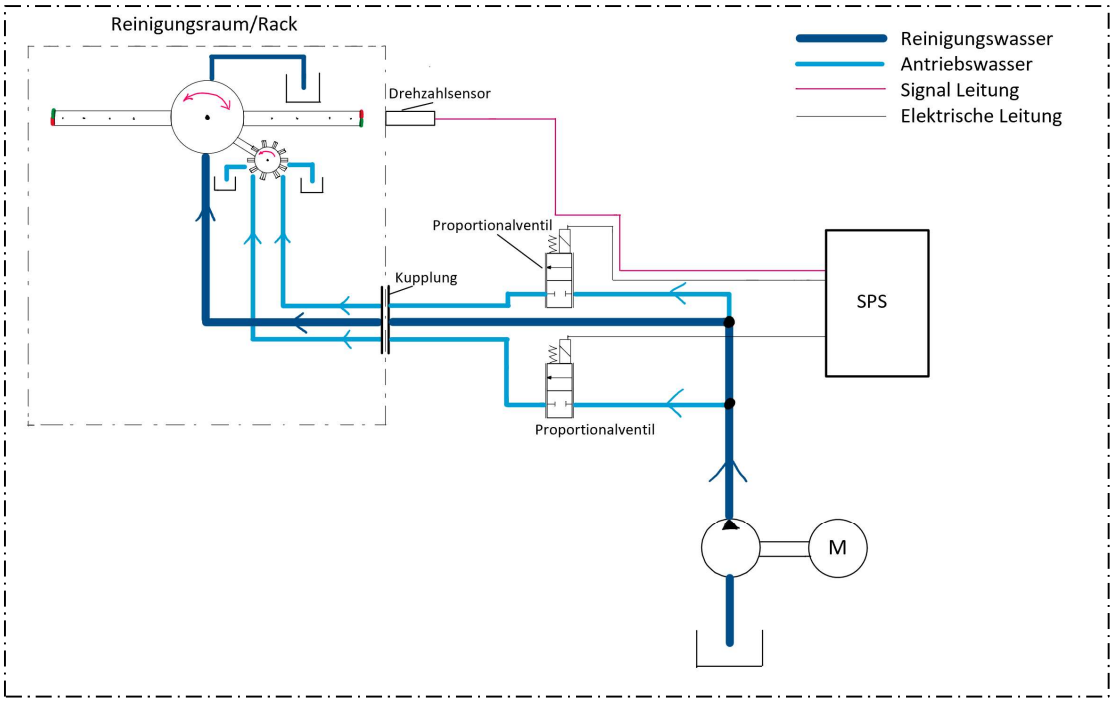


Abbildung 14: Schema Antriebssystem

Bei den Reinigungsanlagen werden je nach Waschgüter unterschiedliche Wascharme eingesetzt. Die folgende Arbeit konzentriert sich auf einen standardmässigen Wascharm, der bei den Anlagen häufig verwendet wird. Für die Verwendung des erarbeiteten Antriebskonzeptes bei anderen Wascharmen müssen neue Auslegungsberechnungen gemacht werden.

12.1 Auslegung Durchmesser Wasserrad

Damit der optimale Durchmesser des Wasserrades bestimmt werden kann, werden Berechnungen in Matlab gemacht. Diese Berechnungen sind ähnlich aufgebaut, wie in Kapitel 11.6 «Vorauslegung Wasserantrieb». Sie stützen sich ebenfalls auf das Prinzip des Impulssatzes. Es werden jedoch nicht die Extremzustände mit stillstehendem Wasserrad, sondern mit drehendem Wasserrad betrachtet. Diese Betrachtungsweise bringt eine Verminderung des Antriebsmomentes mit sich. Der Effekt tritt auf, weil die Antriebskraft aufgrund eines kleineren Geschwindigkeitsunterschiedes zwischen der Wasserradschaufel und dem Wasserstrahl verkleinert wird. Die Drehzahl des Wasserrades liegt im Betrieb zwischen 582 und 1047.6 U/min. Diese Drehzahl entspricht mit einer Übersetzung von 23.28:1 (siehe Kapitel 12.4 «Auslegung der Stirnräder für die Übersetzung») der geforderten Drehzahl des Wascharmes zwischen 25 und 45 U/min. Aufgrund der unterschiedlichen Drehzahlen des Wasserrades ergeben sich unterschiedliche Geschwindigkeitsunterschiede und somit unterschiedliche Antriebsmomente bei gleichbleibendem Wasserdruck. Wenn sich der Wasserdruck verändert, hat dies ausserdem einen Einfluss auf das Antriebsverhalten. Um das Antriebsmoment des Wasserrades bei unterschiedlichen

Wasserdrücken bestimmen zu können, werden die zwei Extremzustände mit dem höchsten und dem niedrigsten Wasserdruck analysiert. Der höchste Arbeitsdruck liegt bei 1.7 bar und der kleinste bei 0.8 bar. Die Betrachtung dieser beiden Extremzustände deckt den gesamten Arbeitsbereich der Reinigungsanlage ab. In Abbildung 15 «Plot der Antriebsmomente» sind die Antriebsmomente bei den unterschiedlichen Betriebsdrücken grafisch dargestellt. Die horizontalen Linien (gelb, violett) zeigen die Antriebsmomente mit den Antriebsbohrungen am bestehenden Wascharm. Die Momente des bestehenden Systems sind über den gesamten Drehzahlbereich konstant, weil diese nur von der Fliessgeschwindigkeit des Wassers vor und nach der Antriebsbohrung abhängen. Sie haben jedoch unterschiedliche Niveaus, weil bei dem Wasserdruck von 1.7 bar der maximale Volumenstrom von 5 m^3/h (siehe Kapitel 8.1 «Anforderungsliste») und bei 0.8 bar 70% von 5 m^3/h angenommen werden.

Die Getriebeübersetzung von ursprünglich 8:1 bei der Vorauslegung wird auf 23.28:1 geändert. Durch diese erhöhte Übersetzung kann der Durchmesser des Wasserrades auf 50 mm reduziert werden. Dadurch kann der gesamte Antrieb kompakter gebaut und der Sprühschatten unterhalb vom Getriebe verkleinert werden. Die grosse Übersetzung von 23.28:1 wird einerseits von einem zweistufigen Planetengetriebe (siehe Kapitel 12.5 «Planetengetriebe») mit 9.7:1 und andererseits mit einem Stirnradgetriebe (siehe Kapitel 12.4 «Auslegung Stirnräder für die Übersetzung») mit 2.4:1 realisiert. Durch den Wirkungsgrad von 80% des Planetengetriebes und einem geschätzten Gesamtwirkungsgrad des gesamten Antriebsstranges (Lager, Stirnradgetriebe, Dichtungen, Planetengetriebe) von 70% wird das Antriebsmoment entsprechend reduziert.

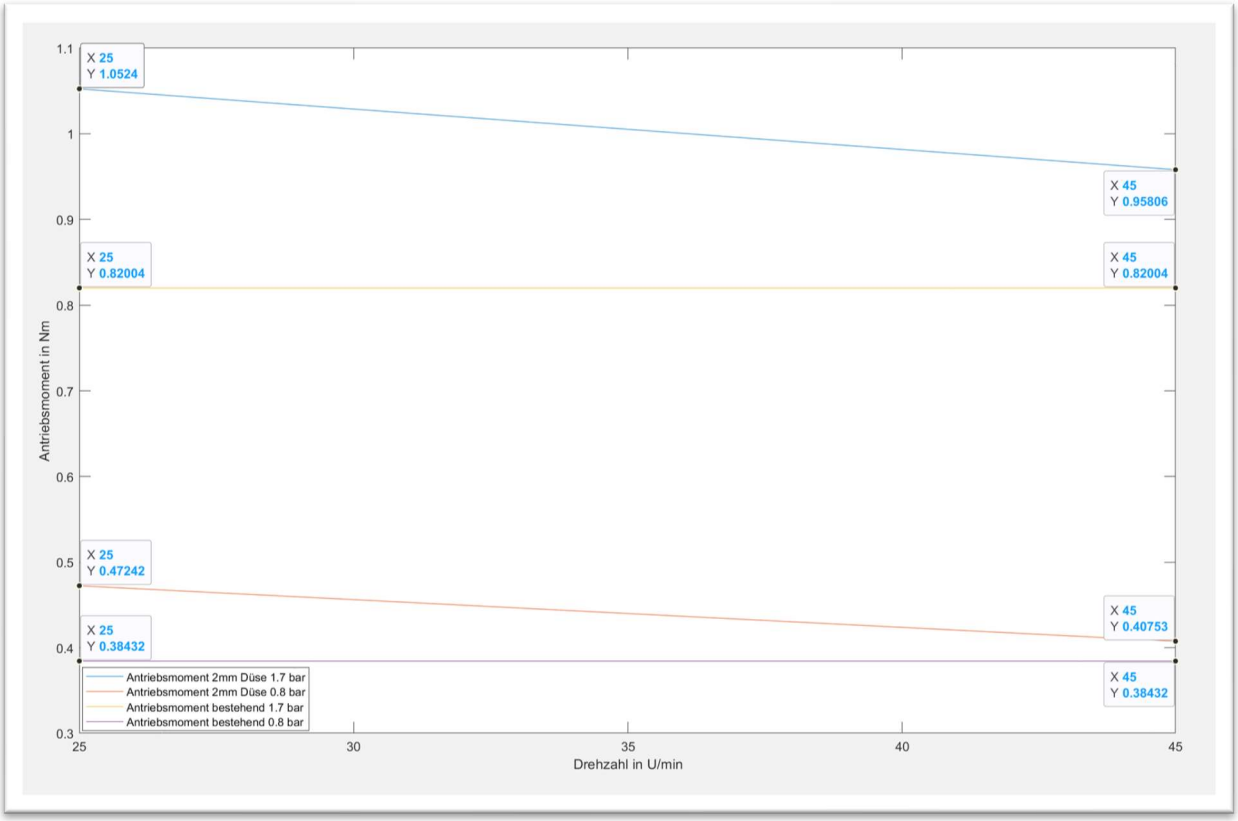


Abbildung 15: Plot der Antriebsmomente

In Abbildung 16 «Berechnung mit Matlab» sind die Formeln der Matlab-Berechnung zu sehen. Als erstes wird der Antrieb mit dem Wasserrad und einer Übersetzung von 23.28:1 bei den Drücken von 1.7 und 0.8 bar berechnet. Im nächsten Schritt wird das Antriebsmoment des bestehenden Systems bei den gleichen Drücken berechnet. Diese Berechnungen führen zur Grafik in Abbildung 15 «Plot der Antriebsmomente».

In dieser Grafik ist zu sehen, dass die Differenz des Antriebsmomentes zwischen dem bestehenden System und dem geplanten Wasserradantrieb bei einem Druck von 0.7 bar und einer Drehzahl von 45 U/min des Wascharmes am kleinsten ist. Dieser Punkt ist für die Auslegung relevant, weil er am meisten kritisch ist. Die vorhandene Differenz von rund 0.02 Nm wird verwendet, um allfällige Unterschiede zwischen der Theorie und der Praxis ausgleichen zu können.

```
%% Globale Variablen
roh=1000      % [kg/s] Dichte Wasser
n=(25:45)     % [U/min] Drehzahl zwischen 25 und 45 U/min

%% Antrieb Wasserrad
d=0.05              % [m] Durchmesser Wasserrad (vorher d=0.09)
i=23.28                % Übersetzung (vorher i=8)
z=2                 % Anzahl Düsen
dd=2                % [mm] Düsendurchmesser
A2=dd^2*pi/(4*10^6) % [m^2] Düsenöffnungsquerschnitt
eta=0.7             % Wirkungsgrad des Antriebes

%% Druck 1.7 bar
Vpunkt17=2.85                       %[l/min] Volumenstrom
vnozzle17=Vpunkt17/(60000*A2)       % [m/s] Wasserstrahlgeschwindigkeit
mpunkt17=roh*A2*vnozzle17           % [kg/s] Massenstrom Wasser
u=n*d*pi/60*i                       % [m/s] Umfangsgeschwindigkeit des Wasserrades
F17=2*mpunkt17*(vnozzle17-u)*z*eta  % [N] Impulskraft mit zwei Düsen
M17=F17*d/2*i                       % [Nm] Antriebsmoment mit zwei Düsen

%% Druck 0.8 bar
Vpunkt08=1.96                       %[l/min] Volumenstrom
vnozzle08=Vpunkt08/(60000*A2)       % [m/s] Wasserstrahlgeschwindigkeit % [m/s] ↙
Fliessgeschwindigkeit Wasser aus 2mm Düse bei 0.8 bar
mpunkt08=roh*A2*vnozzle08           % [kg/s] Massenstrom Wasser 2mm Düse bei 0.8 bar
u=n*d*pi/60*i                       % [m/s] Umfangsgeschwindigkeit des Wasserrades
F08=2*mpunkt08*(vnozzle08-u)*z*eta  % [N] Impulskraft mit zwei Düsen
M08=F08*d/2*i                       % [Nm] Antriebsmoment mit zwei Düsen

%% Antrieb bestehend mit Bohrungen
Z=2                     % Anzahl Antriebsbohrungen
DD=3                    % [mm] Durchmesser Antriebsbohrung
l=0.26175               % [m] Abstand von Drehachse zu Antriebsbohrung
rdi=14                  % [mm] Rohrinnendurchmesser von Wascharmen
Arohr=rdi^2*pi/(4*10^6) % [m^2] Rohrinnenquerschnitt von Wascharm
A3=DD^2*pi/(4*10^6)     % [m^2] Düsenöffnungsquerschnitt

%% Druck 1.7 bar
Vpunktges=5/3600                % [m^3/s] Volumenstrom durch die Hauptleitung
vra17=Vpunktges/(2*Arohr*2)     % [m/s] Fliessgeschwindigkeit Rohr von Wascharm bei ↙
Antriebsbohrung
Vpunkt173=6.81                  % [l/min] Volumenstrom durch 3mm Düse
vA17=Vpunkt173/(A3*60000)       % [m/s] Fliessgeschwindigkeit Wasser 3mm Bohrung
mpunkt173=roh*A3*vA17           % [kg/s] Massenstrom durch 3mm Düse
F173=mpunkt173*(vA17-vra17)*Z   % [N] Antriebskraft von 2 Düsen auf den Wascharm
M173=F173*l*ones(size(n))       % [Nm] Antriebsmoment Wascharm

%% Druck 0.8 bar
Vpunktges=3.5/3600              % [m^3/s] Volumenstrom durch die Hauptleitung
vra08=Vpunktges/(2*Arohr*2)     % [m/s] Fliessgeschwindigkeit Rohr von Wascharm bei ↙
Antriebsbohrung
Vpunkt083=4.67                  % [l/min] Volumenstrom durch 3mm Düse

vA08=Vpunkt083/(A3*60000)       % [m/s] Fliessgeschwindigkeit Wasser 3mm Bohrung
mpunkt083=roh*A3*vA08           % [kg/s] Massenstrom durch 3mm Düse
F083=mpunkt083*(vA08-vra08)*Z   % [N] Antriebskraft von 2 Düsen auf den Wascharm
M083=F083*l*ones(size(n))       % [Nm] Antriebsmoment Wascharm
```

Abbildung 16: Berechnung mit Matlab

In Abbildung 17 «Konstruktion Wasserrad mit Peltonschaufeln» ist der Konstruktionsentwurf des geplanten Wasserrades zu sehen. Die Wasserschaufeln sind als Halbschalen ausgeführt. Die Anordnung

der Schaufeln ist ähnlich, wie bei einer Peltonturbine. Der Hauptunterschied liegt darin, dass jeweils für beide Drehrichtungen Wasserschaufeln vorhanden sind. Bei der folgenden Konstruktion werden 20 Schaufelpakete (für linke und rechte Drehrichtung) verwendet. Die Anzahl Schaufeln und dessen Grösse müssen allenfalls nach Versuchen mit dem Funktionsmuster noch angepasst werden. Die Breite der Becher sollte ungefähr das Dreifache des Wasserstrahldurchmessers betragen (energie.ch, 2021). Aus diesem Grund beträgt die Becherbreite beim Funktionsmodell rund 7 mm, weil davon ausgegangen wird, dass sich der 2mm breite Wasserstrahl nach der Düse ein wenig vergrössert. Um den Einfluss der Bechergrösse auf den Wirkungsgrad bestimmen zu können, wird beim Funktionsmodell zusätzlich ein Wasserrad mit doppelt so grossen Bechern getestet.

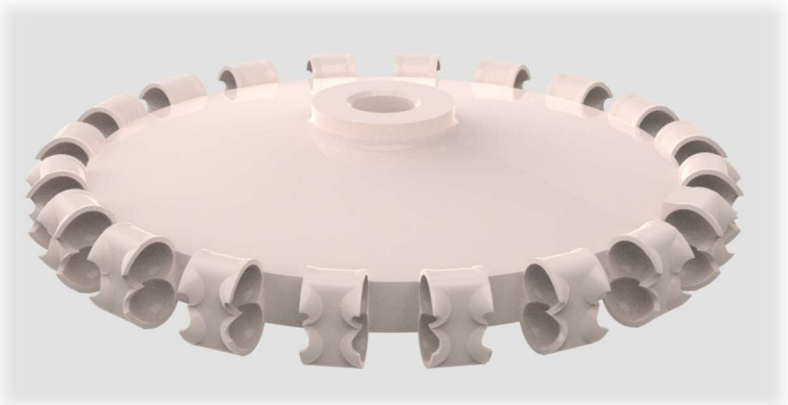


Abbildung 17: Konstruktion Wasserrad mit Peltonschaufeln

12.2 Wassereinsparpotenzial

Für den neuen Antrieb des Wascharmes werden statt zwei 3 mm Düsen nur zwei 2 mm Düsen verwendet. Dieser kleinere Strömungsquerschnitt führt zu einer Reduzierung des Wasserverbrauches. Nachfolgend wird das maximale Einsparpotenzial von Antriebswasser bei einem Druck von 1.7 bar berechnet.

$$\Delta\dot{V} = Wassereinsparpotenzial\ [\frac{l}{min}]$$

$$\dot{V}_{2mm} = Volumenstrom\ 2\ mm\ Düse\ bei\ 1.7\ bar\ \left[\frac{l}{min}\right]$$

$$\dot{V}_{3mm} = Volumenstrom\ 3\ mm\ Düse\ bei\ 1.7\ bar\ [\frac{l}{min}]$$

$$z = Anzahl\ Düsen\ [-]$$

$$\dot{V}_{2mm} = 2.85\ l/min$$

$$\dot{V}_{3m} = 6.81\ l/min$$

$$z = 2$$

$$\Delta\dot{V} = \left(\dot{V}_{3mm} - \dot{V}_{2mm}\right) * z = (6.81 - 2.85) * 2 = \underline{\underline{7.92\ l/min}} = \underline{\underline{475.2\ l/h}}$$

Da der Antrieb des Wascharmes mit zwei 2 mm Düsen pro Drehrichtung gebaut wird, entsteht ein Wassereinsparpotenzial gegenüber dem bisherigen Antrieb mit 3 mm Düsen von rund 475.2 l/h bei einem maximalen Wasserdruck von 1.7 bar. Durch diese Reduktion des Wasserverbrauches lohnt es sich zu prüfen, ob die Wasserpumpe verkleinert und somit der Energiebedarf der Reinigungsanlage reduziert werden kann.

12.3 Werkstoffe

Die Werkstoffe, welche für den Antrieb des Wascharmes verwendet werden dürfen, sind vom Auftraggeber vorgegeben. Diese müssen jeweils über eine FDA-Freigabe (siehe Kapitel 8.3 «FDA-Zertifikat») verfügen, weil sie mit den Reinigungsmedium in Kontakt treten.

Bei den Metallen, die mit dem Reinigungsmedium in Kontakt treten, werden die Edelstahllegierungen 304 (X5CrNi18-10) und 316L (X2CrNiMo17-12-2) verwendet. Für Metallteile, welche nicht in direktem Kontakt mit dem Reinigungsmedium stehen, werden allgemeine nichtrostende Stähle verwendet.

Viele Teile werden aus Kunststoff hergestellt. Der verwendete Kunststoff trägt die Bezeichnung PEEK (Polyetheretherketon). Dieses Material gehört zu den Thermoplastischen Hochleistungskunststoffen und erfüllt die Richtlinien der FDA (Food and Drug Administration). Der Kunststoff ist aufgrund seiner Robustheit für den Kontakt mit dem Reinigungsmedium geeignet. Die spezifischen Kenndaten dieses Materials sind im Anhang 7.1 «PEEK» zu finden.

12.4 Auslegung der Stirnräder für die Übersetzung

Bei der Auslegung des Antriebes stellte sich heraus, dass eine Übersetzung der Antriebsdrehzahl des Wasserrades nötig ist, damit ein genügend hohes Drehmoment realisiert werden kann. Die Gesamtübersetzung von 23.28:1 wird mit einem Planetengetriebe und einer Stirnradübersetzung gemacht. Eine Verzahnung hat den Vorteil, dass sie robust und der konstruktive Aufwand gering ist. Sie kann

ausserdem verbaut werden, weil durch den Antrieb mit einem Wasserrad keine Überlastsicherung nötig ist. Ansonsten wäre die Kraftübertragung mittels Reibräder oder Riemen sinnvoller. Die Stirnradübersetzung wird mit zwei geradeverzahnten Stirnrädern umgesetzt. Sie erreichen eine Übersetzung von 2.4:1.

Die Zahnräder werden aus dem Kunststoff PEEK hergestellt. Dieses Material gehört zu den thermoplastischen Hochleistungskunststoffen und erfüllt die Richtlinien der FDA (Food and Drug Administration) (Amsler & Frey AG, 2021). Die spezifischen Kenndaten dieses Materials sind im Anhang Kapitel 7.1 «PEEK» zu finden. Die Auslegung der Zahnräder wird mit Hilfe der Software KISSsoft gemacht. Bei dieser Software können die Zähnezahlen der Stirnräder, der Modul, die Materialien und die Belastung eingegeben werden. Der Achsabstand wird aufgrund der Eingaben von der Software vorgeschlagen. Die Geometrie der Verzahnung, die Sicherheit gegen Bruch und viele weitere technische Details werden anschliessend von KISSsoft berechnet. Die detaillierte Dokumentation dieser Zahnradberechnung ist im Anhang Kapitel 6 «Zahnradberechnung mit KISSsoft» zu finden. In Abbildung 18 «Berechnung Verzahnung mit KISSsoft» und Abbildung 19 «Berechnung Festigkeit mit KISSsoft» sind Ausschnitte dieser Berechnungen zu sehen. Die Festigkeit wird nur für den statischen Fall berechnet. Dies hat einerseits den Grund, weil in der Datenbank von KISSsoft keine dynamischen Festigkeitskennwerte für PEEK hinterlegt sind und andererseits ist dies nicht nötig, weil das Antriebsmoment bei Stillstand des Wascharmes am Grössten ist.

		------ Rad 1	---------- Rad 2 --
Leistung (mW)	[P]	4600.000	
Drehzahl (1/min)	[n]	108.0	45.0
Drehmoment (Nm)	[T]	0.407	0.976
Anwendungsfaktor	[KA]	1.00	
Geforderte Lebensdauer (h)	[H]	0.00	
Rad treibend (+) / getrieben (-)		+	-
Arbeitsflanke Rad 1:	Rechte Flanke		
Drehrichtung Rad 1:	im Uhrzeigersinn		

Zahngeometrie und Werkstoff

Geometrieberechnung nach	ISO 21771:2007, DIN ISO 21771		
		------ Rad 1	---------- Rad 2 --
Achsabstand (mm)	[a]	43.000	
Achsabstandstoleranz	ISO 286:2010 Abmass js7		
Normalmodul (mm)	[mn]	1.0000	
Normaleingriffswinkel (°)	[αn]	20.0000	
Schrägungswinkel am Teilkreis (°)	[β]	0.0000	
Zähnezahl	[z]	25	60
Zahnbreite (mm)	[b]	5.00	5.00
Schrägungsrichtung	Geradverzahnt		
Verzahnungsqualität	[Q-ISO 1328:2013]	A6	A6
Innendurchmesser (mm)	[di]	0.00	0.00
Innendurchmesser der Bandage (mm)	[dbi]	0.00	0.00

Werkstoff

Rad 1
PEEK (VDI2736), Thermoplast (POM, PPA, etc.), unbehandelt
VDI2736[S C]

Rad 2
PEEK (VDI2736), Thermoplast (POM, PPA, etc.), unbehandelt
VDI2736[S C]

Abbildung 18: Berechnung Verzahnung mit KISSsoft

In Abbildung 19 sind die in der KISSsoft-Datenbank hinterlegten Festigkeitsdaten von PEEK (Streckgrenze und Bruchfestigkeit) zu sehen. Aufgrund der vorhandenen Belastungen, ergibt sich eine Zahnfussspannung von 19.54 N/mm^2 beim Rad 1 und 18.73 N/mm^2 beim Rad 2. Bei einer zulässigen Zahnfussspannung gegen bleibende Verformung von 155.45 N/mm^2 errechnet sich dadurch eine Sicherheit gegen bleibende Verformung von 7.95 für das Rad 1 und 8.30 für das Rad 2. Dies ist rund das Fünffache der geforderten Minimalsicherheit von 1.5. Die Sicherheit gegen Bruch ist mit 13.75 für das Rad 1 und 14.35 für das Rad 2 noch grösser. Auf Grund dieser hohen Sicherheitswerte kann angenommen werden, dass die dynamische Festigkeit für die beiden Stirnräder eingehalten wird. Aus diesem Grund erfüllen die berechneten Zahnräder die Festigkeitsanforderungen für die gegebenen Bedingungen.

Streckgrenze (N/mm²)	[σS]	77.73	77.73	
Bruchfestigkeit (N/mm²)	[σB]	134.36	134.36	
Daten aus Datei σS1:Z014-108.DAT				
Daten aus Datei σB1:Z014-108.DAT				
Daten aus Datei σS2:Z014-108.DAT				
Daten aus Datei σB2:Z014-108.DAT				
Zahnfuss-Temperatur (°C)	[TR]	70.0	70.0	
Sicherheit gegen bleibende Verformung	[Ss=σS/σF]	7.03	9.34	
Sicherheit bezüglich Bruchfestigkeit	[Sb=σB/σF]	12.15	16.15	
Für Kunststoffe (VDI2736):				
Berechnungsformel: σF0 = Ft / beff / mn * YF * YS * Yε * Yβ				
Spannungskorrekturfaktor	[YS]	1.77	2.25	
Zahnfussspannung (N/mm²)	[σF]	19.54	18.73	
Sollsicherheit	[SSmin(plastic)]	1.50		
	[SBmin(plastic)]	2.00		
Zulässige Zahnfussspannung (N/mm²)	[σFP,sS]	155.45	155.45	
(N/mm²)	[σFP,sB]	268.73	268.73	
Berechnungsformel:	σFP,sS = 2.0*σS/SSmin; σFP,sB = 2.0*σB/SBmin			
Sicherheit gegen bleibende Verformung	[Ss=σFP,sS/σF]	7.95	8.30	>= 1.5
Sicherheit bezüglich Bruchfestigkeit	[Sb=σFP,sB/σF]	13.75	14.35	>= 2.0

Abbildung 19: Berechnung Festigkeit mit KISSsoft

12.5 Planetengetriebe

Um eine grösstmögliche Übersetzung bei kleinem Platzbedarf realisieren zu können, bieten sich Planetengetriebe an. Sie werden in ein- oder mehrstufigen Ausführungen gebaut. Für dieses Projekt wird ein Planetengetriebe der Serie 20/1R vom Hersteller Faulhaber verwendet. Dieses Planetengetriebe erreicht eine Übersetzung von 9.7:1 mit zwei Getriebestufen. Es besitzt einen Gesamtwirkungsgrad von 80%. Das zulässige Dauerdrehmoment liegt bei 0.8 Nm und kurzzeitig sind bis 1.1 Nm möglich (Faulhaber, 2021).

Das Planetengetriebe wird direkt mit dem Wasserrad verbunden und macht somit die erste Übersetzungsstufe. Die zweite Übersetzungsstufe wird mit dem Stirnradgetriebe (siehe Kapitel 12.4 «Auslegung der Stirnräder für die Übersetzung») erreicht. Das maximale Drehmoment des Planetengetriebe liegt rechnerisch bei 0.44 Nm (Maximales Drehmoment aus Abbildung 15 «Plot der Antriebsmomente» dividiert durch die Stirnradübersetzung von 2.4). Damit wird eine Sicherheit von 1.8 erreicht.

Abbildung 20: Planetengetriebe Serie 20/1R (Faulhaber, 2021)

12.6 Lager

Auf Basis der Zahnradberechnung mit KISSsoft ergeben sich Radialkräfte auf die Lagerung der Zahnräder. Axialkräfte treten aufgrund der Geradeverzahnung nicht auf. Die Radialkräfte F_r ergeben sich durch das Abwälzen der Verzahnung und sind nach Betrag 11.8 N. Die Umfangskraft F_t beträgt pro Zahnrad 32.5 N und entsteht durch das Antriebsmoment. In Abbildung 21 «Kräfte am Zahnrad» sind die wirkenden Kräfte eingezeichnet. F_{norm} ist die resultierende Kraft, die sich aus der Umfangs- und der Radialkraft ergibt.

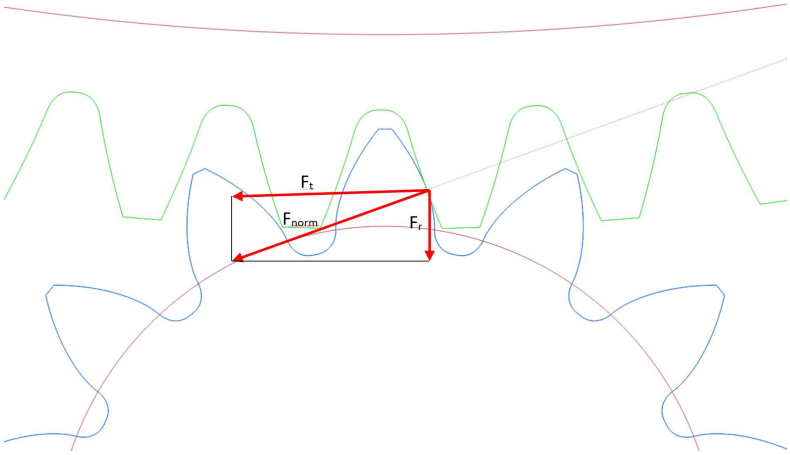


Abbildung 21: Kräfte am Zahnrad

Für die Lagerberechnung wird nur die Radialkraft benötigt. Axialkräfte treten aufgrund der geraden Verzahnung keine auf. Die einzigen Axialkräfte, welche die Lagerung aufnehmen muss, sind Gewichtskräfte der Bauteile. Diese sind allerdings sehr klein und können daher vernachlässigt werden. Die Radialkräfte des kleinen Stirnrades werden durch das Planetengetriebe aufgenommen. Die zulässigen Radialkräfte des Planetengetriebes liegen bei 75 N (siehe Anhang Kapitel 5.7 «Planetengetriebe»). Die geforderten 11.8 N stellen hiermit kein Problem dar.

Am Wasserrad entsteht durch den Antrieb im Extremfall bei stehendem Wasserrad, maximalem Wasserdruck von 1.7 bar und zwei Wasserdüsen, die in dieselbe Richtung spritzen eine Querkraft von 2.87 N (siehe Abbildung 22 «Querkraft durch Wasserrad»). Diese Kraft ist so klein, dass sie für die Auslegung des Rillenkugellagers mit der Bezeichnung W 6001-2RSL von SKF nicht relevant ist.

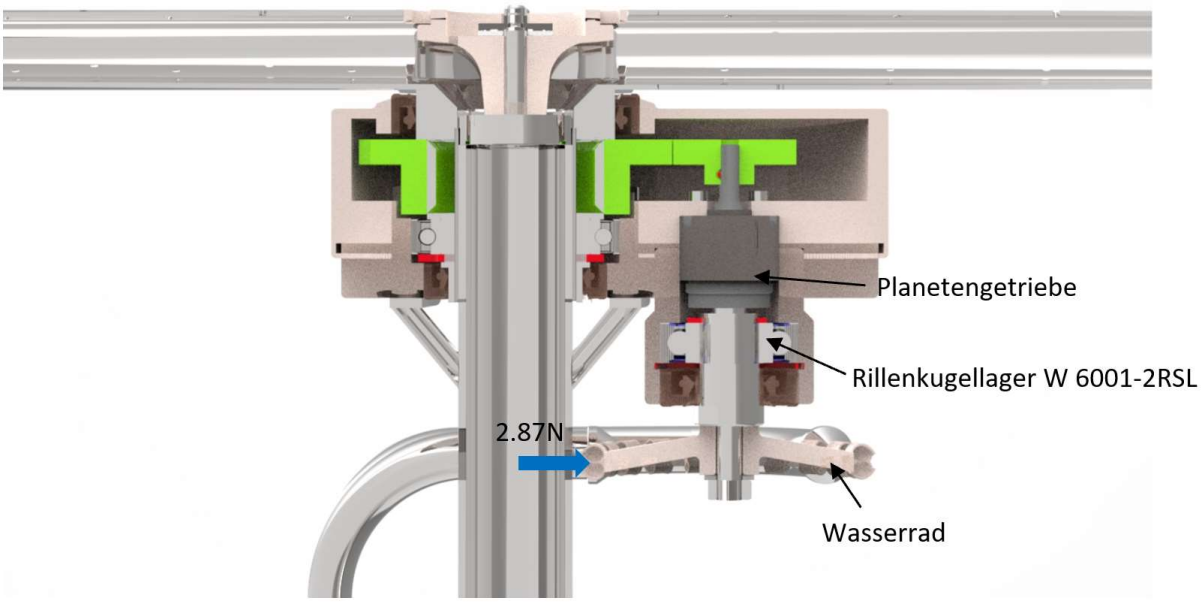


Abbildung 22: Querkraft durch Wasserrad

Aufgrund von äusseren Kräften auf die Wascharme entsteht eine Radialbelastung auf das Rillenkugellager unterhalb des grossen Stirnrades. Angenommen wird eine äussere Kraft von 50 N auf den äussersten Punkt des Wascharmes (siehe Abbildung 23 «Äussere Belastung des Wascharmes»). Diese Kraft kann beispielsweise durch versehentliches Anstossen bei der Wartung auftreten und ist nur statisch zu beurteilen.

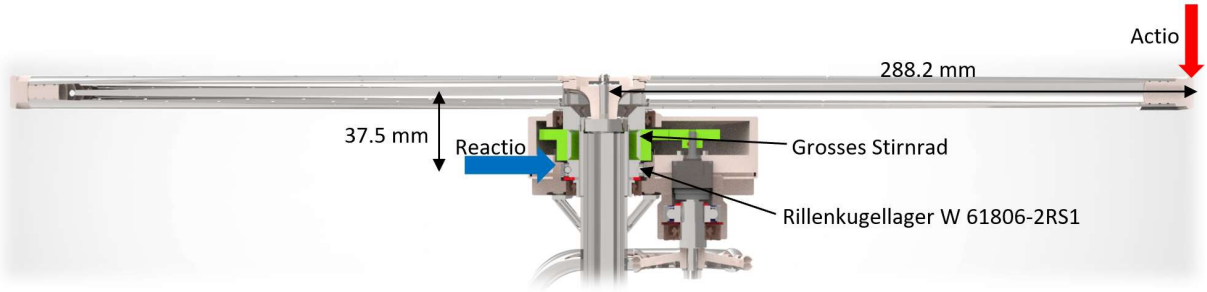


Abbildung 23: Äussere Belastung des Wascharmes

Um die Sicherheit gegen statische Überlast berechnen zu können, wird die Radiale Belastung auf das Lager aufgrund einer äusseren Belastung berechnet.

$$F_r = Radialkraft\ auf\ das\ Lager\ [N]$$

$$F = Äussere\ Belastung\ [N]$$

$$l_1 = Radius\ des\ Wascharmes\ [m]$$

$$l_2 = Distanz\ Mitte\ Rohr\ bis\ Mitte\ Lager\ [m]$$

$$F = 50\ N$$

$$l_1 = 0.2882\ m$$

$$l_2 = 0.0375\ m$$

$$F_r = F * \frac{l_1}{l_2} = 50 * \frac{0.2882}{0.0375} = \underline{\underline{384.26\ N}}$$

Die statische Radialbelastung des Rillenkugellagers mit der Bezeichnung W 61806-2RS1 beträgt 384.26 N. Der Hersteller SKF gibt dafür eine statische Tragzahl von 2’900 N an (siehe Anhang Kapitel 5.8 «Rillenkugellager 61806-2RS1»). Nachfolgend wird die Sicherheit gegen statische Überlast berechnet.

$$X = Radialfaktor\ [-]$$

$$Y = Axialfaktor\ [-]$$

$$P_0 = statische\ Lagerbelastung\ [N]$$

$$C_0 = Statische\ Tragzahl\ [N]$$

$$F_r = Radialbelastung\ [N]$$

$$F_a = Axialbelastung\ [N]$$

$$S = Sicherheitsfaktor\ gegen\ statische\ Überlast\ [-]$$

$$S_{min} = Mindestsicherheitsfaktor\ [-]$$

$$X = 1$$

$$Y = 0$$

$$C_0 = 2900\ N$$

$$F_r = 384.26\ N$$

$$F_a = 0\ N$$

$$S_{min} = 4$$

$$P_0 = X * F_r + Y * F_a = 1 * 384.26 + 0 * 0 = 384.26\ N$$

$$S = \frac{C_0}{P_0} = \frac{2900}{384.26} = \underline{\underline{7.55}} > 4 = S_{min}$$

Durch die grosse statische Sicherheit von 7.55 ist eine äussere Belastung von 50 N auf den äussersten Punkt des Wascharmes für das Rillenkugellager kein Problem. Dieses Lager wird als Loslager eingebaut und muss somit keine Axialkräfte übertragen. Die axial wirkenden Kräfte werden vom bereits verbauten Gleitlager (siehe Abbildung 24 «Bauteile und Kraftfluss des Antriebes») aufgenommen.

12.7 Wellendichtringe

Um das Gehäuse mit den darin liegenden Zahnrädern und Lagern von eintretendem Wasser und Reinigungsmittel zu schützen, werden die drehenden Teile durch Wellendichtringe mit Staublippe abgedichtet. Die Dichtringe werden so montiert, dass die Staublippe auf der Aussenseite des Gehäuses liegt und somit für die Abdichtung sorgt. Da in der Waschkammer derselbe Druck gegenüber dem Getriebegehäuse herrscht, reicht diese Abdichtung gegen ein Eintreten des Reinigungsmediums in das Gehäuse. Für die Wellendichtringe wird der Kunststoff PTFE (Polytetrafluorethylen) verwendet. Dieser ist von der FDA freigegeben und eignet sich für Anwendungen im Pharmabereich (Prelon Dichtsystem, 2021). Das PTFE besitzt zudem gute Gleiteigenschaften. Dadurch reduziert sich die Gefahr von Abrieb auf ein Minimum und die Lebensdauer wird grösser. Wellendichtringe aus PTFE sind in allen gängigen Standardgrössen verfügbar (ebd.).

12.8 Wasserdüsen

Die Wasserdüsen, welche das Antriebswasser beschleunigen bevor es auf die Wasserradschaufeln trifft, haben einen Öffnungsdurchmesser von 2 mm. Pro Drehrichtung werden zwei Düsen verwendet. Die Düsen produzieren einen Vollstrahl. Als Material wird Edelstahl verwendet. Für die Montage wird ein Innengewinde der Grösse G 1/8 Zoll benötigt (Breconcherry, 2021). Als Versorgungsleitung und Montagepunkt der Düsen wird ein Rohr mit 10 mm Aussendurchmesser verbaut. Die Düsen werden von der Firma Breconcherry hergestellt. Genaue Spezifikationen zu den Düsen sind im Anhang Kapitel 5.5 «Wasserdüsen» zu finden.

12.9 Ventile

Um die Drehzahl des Wasserrades genau einstellen zu können, wird pro Drehrichtung ein Proportional-Stromventil verwendet. Ein Proportionalventil hat den Vorteil, dass der Durchfluss stufenlos eingestellt werden kann. Es wird über einen Elektromagneten betätigt und benötigt somit einen elektrischen Betätigungsstrom. Die Spannung, welche von der vorhandenen Steuerung zur Verfügung steht, beträgt 24 V. Das für die Auslegung verwendete Ventil des Typs SCB202A064V-T wird von der Firma ASCO Numatics hergestellt. Es verfügt über eine Nennweite von 4.0 mm und besteht aus Edelstahl AlSI 303. Der Durchflusskoeffizient dieses Ventils beträgt 7.0 l/min (Ventile 24, 2021). Dieser Wert reicht für die Speisung von zwei 2mm Wasserdüsen aus. Das Datenblatt zum entsprechenden Ventil ist im Anhang Kapitel 5.6 «Proportionalventil» zu finden.

12.10 Konstruktion

In diesem Kapitel wird das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten aus den vorherigen Kapiteln als Gesamteinheit beschrieben. In Abbildung 24 «Bauteile und Kraftfluss des Antriebes» sind die wichtigsten Komponenten des Antriebssystems dargestellt. Der Kraftfluss ist als rote Linie gezeichnet. Er startet bei dem Wasserrad. Das Wasserrad wird mit jeweils zwei Wasserstrahlen pro Drehrichtung angetrieben. Es wird durch ein M5 Standardgewinde mit der Welle verbunden und mit einer Kontermutter gesichert. Die Welle ist durch ein Rillenkugellager und das Planetengetriebe gelagert. Das Rillenkugellager ist axial jeweils mit einem Sicherungsring gesichert. Die Welle gilt als Antriebswelle des Planetengetriebes, das über eine zweistufige Übersetzung verfügt. Auf der Abtriebs-Seite des Planetengetriebes ist ein geradeverzahntes Stirnradritzel montiert. Dieses kleine Stirnrad treib das grosse Stirnrad mit einer Übersetzung von 2.4:1 an. Das grosse Stirnrad ist mit einem M36x1.5 Feingewinde mit dem

zentralen Drehteil verbunden. An diesem Drehteil sind die Wascharme montiert. Das Rillenkugellager unterhalb des grossen Stirnrades ist beim Innenring durch einen Sicherungsring gegen axiales Verschieben gesichert. Beim Aussenring kann das Lager Wärmeausdehnungen der Konstruktion in axialer Richtung über einen Loslagersitz ausgleichen. Um den Eintritt von Reinigungswasser in das Getriebe verhindern zu können, werden die drehenden Teile durch Wellendichtringe mit Schutzlippen abgedichtet.

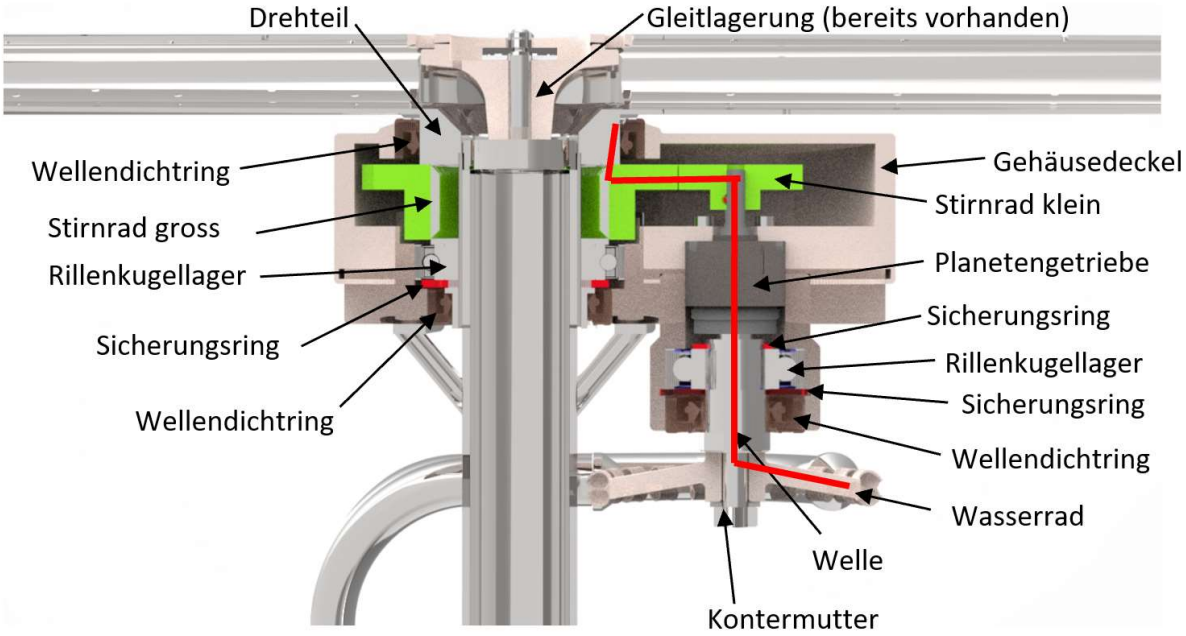


Abbildung 24: Bauteile und Kraftfluss des Antriebes

Die Abbildung 25 «Gesamtansicht Drehbewegung» zeigt den Antrieb des Wasserrades durch Wasser aus zwei Wasserdüsen (blaue Pfeile). Daraus resultiert die Drehbewegung des Wasserrades (roter Pfeil). Durch die Übersetzung und Kraftumlenkung im Inneren des Getriebegehäuses resultiert die Drehbewegung des Wascharmes in die andere Richtung (Grüner Pfeil). Das Getriebegehäuse hat über dem Wasserrad ungefähr denselben Aussendurchmesser, wie das Wasserrad.

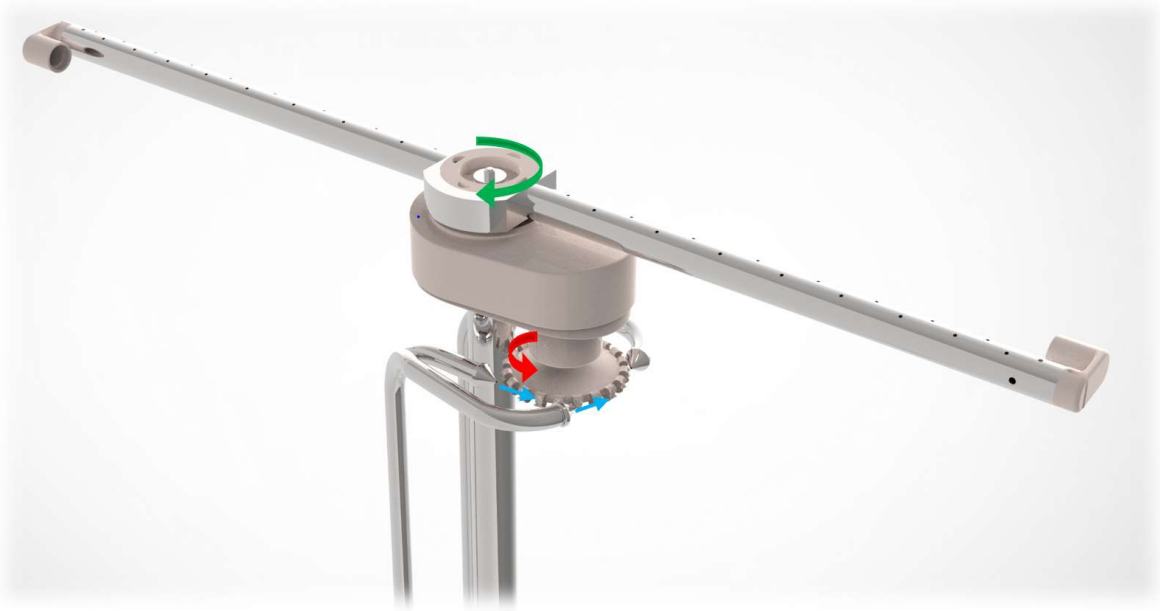


Abbildung 25: Gesamtansicht Drehbewegung

Die Grundplatte, die den gesamten Antrieb trägt, wird mit dem Rohr für die Reinigungswasserzufuhr über zwei Halter verschraubt. Die beiden Halter besitzen jeweils zwei Gewindestifte, die in die Bohrungen der Grundplatte in Abbildung 26 «Befestigung Getriebegehäuse» geführt werden. Gesichert wird die Grundplatte durch eine Sechskantmutter pro Gewindestift. Diese Gehäusehälfte besteht zu einem grossen Teil aus Vollmaterial. Dies hat zum Grund, dass der Herstellungsaufwand und somit die Fertigungskosten so klein wie möglich gehalten werden können. Die Hülse, in der sich das Planetengetriebe und die Lagerung befindet, wird von unten in die Grundplatte eingepresst. Die Hülse und die Grundplatte bestehen aus PEEK-Kunststoff.

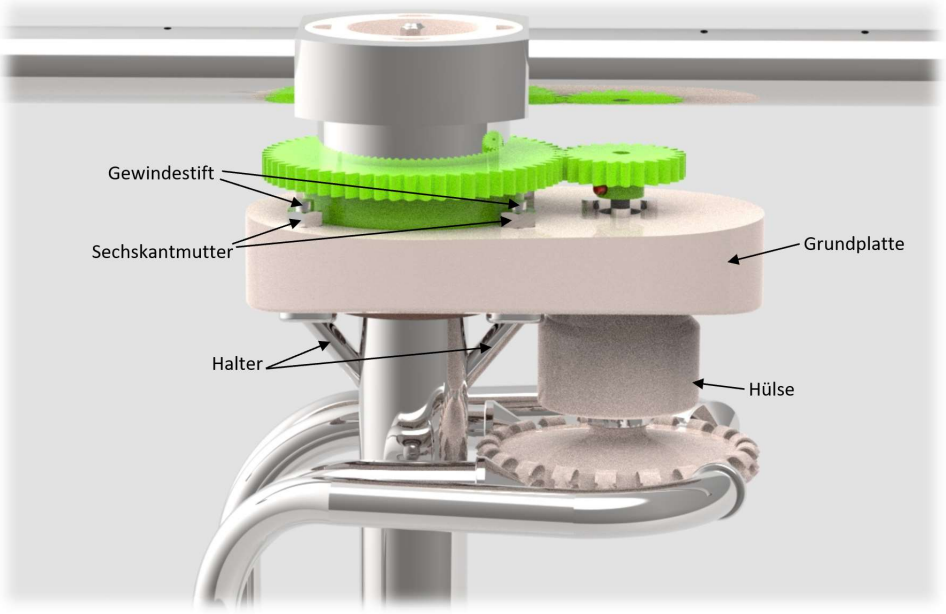


Abbildung 26: Befestigung Getriebegehäuse

Der Deckel des Getriebegehäuses wird von oben über die Grundplatte geschoben. Da dieser Deckel keine äusseren Kräfte aufnehmen muss, reicht ein passgenauer Sitz zwischen der Grundplatte und dem Deckel, damit er sich nicht verschiebt. Um den festen Sitz des Deckels weiter zu verstärken, besitzt er auf der Innenseite eine O-Ring Nut (siehe Abbildung 27 «Deckel Getriebegehäuse»). Der darin eingelegte O-Ring hat zusätzlich die Aufgabe, das Innere des Gehäuses vor Wassereintritt zu schützen.

Abbildung 27: Deckel Getriebegehäuse

Bei der gesamten Konstruktion wird auf ein hygienisches Design geachtet. Das heisst es sollten keine horizontale Flächen vorhanden sein, auf denen Wasser liegenbleiben kann. Sie müssen ein Gefälle von mindestens 3° aufweisen (Fraunhofer, 2021). Vertiefungen auf der Oberseite der Bauteile müssen zwingend vermieden werden, weil sich dort auch Wasser ansammelt und liegen bleibt. Zusätzlich

werden alle Kanten der Bauteile, die mit dem Reinigungsmedium in Berührung kommen, abgerundet. Das begünstigt ein schnelles Abfliessen von Wassertropfen. Durch das herumspritzende Antriebswasser kann zudem eine gewisse Selbstreinigung der Bauteile erzielt werden. In Abbildung 28 «Hygienisches Design» ist die Umsetzung dieser Vorgaben zum hygienischen Design der Komponenten zu sehen. Diese Vorgabe betrifft nur diese Stellen der Bauteile, die mit dem Reinigungsmedium in Berührung kommen.

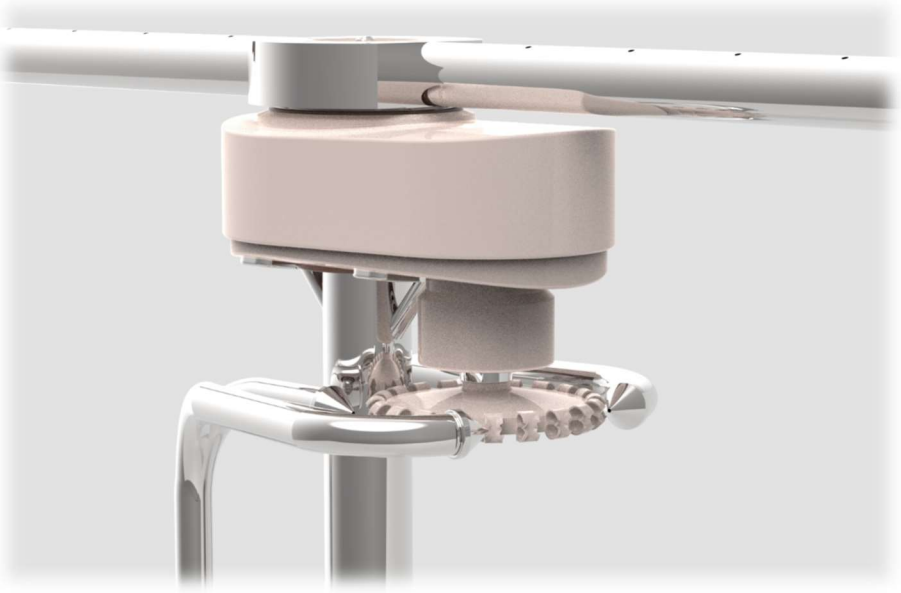


Abbildung 28: Hygienisches Design

Beim Innenbereich des Getriebegehäuses muss das hygienische Design nicht beachtet werden, weil dieser nicht mit dem Reinigungsmedium in Berührung kommt. In Abbildung 29 «Systemgrenze Reinigungsmedium» ist die Systemgrenze rot eingezeichnet, die eine Trennung zwischen «produktberührt» und «nicht produktberührt» aufzeigt. «produktberührt» bedeutet, dass dort das Reinigungsmedium hingelangt und somit die Hygienevorschriften einzuhalten sind. Diese Definition stammt von Fachpersonen der Belimed Life Science. Bei den Materialien auf der «nicht produktberührten» Seite wird auf nichtrostende Materialien geachtet, weil allein feuchte Luft zu einer Oxidation von Metallischen Materialien führen könnte.

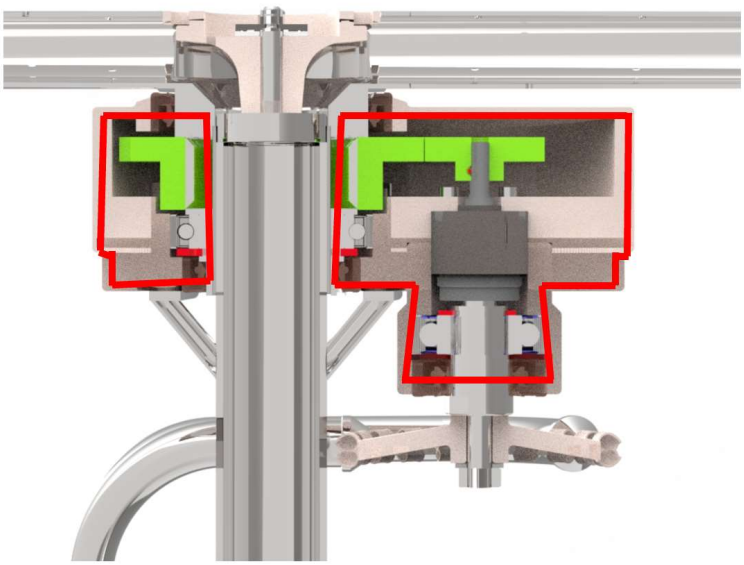


Abbildung 29: Systemgrenze Reinigungsmedium

Die Gesamthöhe des Antriebssystems beträgt vom untersten Punkt des Wasserrades und dem obersten Punkt des Gehäusedeckels 78.5 mm (siehe Abbildung 30 «Abmasse Antriebssystem»). Die Breite des Getriebegehäuses liegt bei 74 mm. Insgesamt benötigt das Antriebssystem in der Breite einen Platz von rund 111 mm. Die Länge des Systems ist mit rund 121 mm ungefähr 10 mm grösser als die Breite.

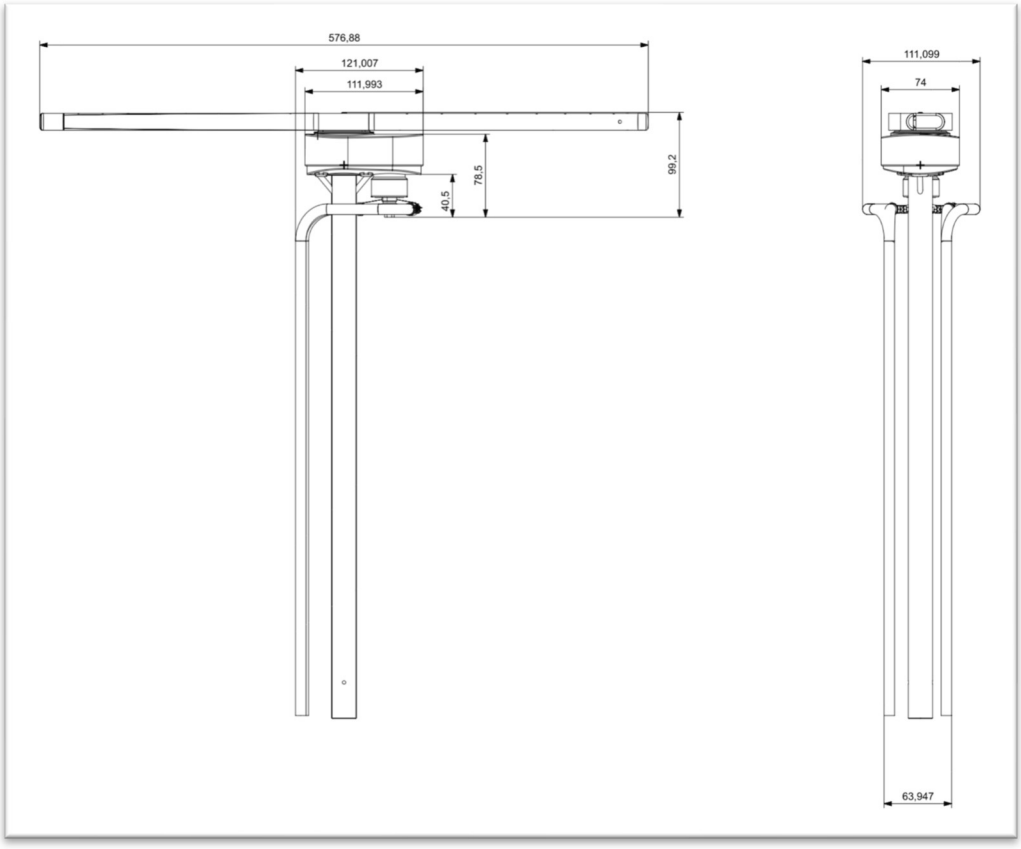


Abbildung 30: Abmasse Antriebssystem

Der Wascharm kann auf einem Waschgutträger so montiert werden, dass er darunterliegende Waschgüter reinigen kann. Damit bei der Reinigung dabei keine Sprühschatten aufgrund des Antriebssystems entstehen, werden die Wasserbohrungen in den Flügeln des Wascharmes schräg angeordnet. Der Schrägstellwinkel muss je nach Abstand des Waschgutes zum Wascharm individuell bestimmt werden. Der Abstand zwischen den Bohrungen wird kleiner, weil sich dessen Gesamtanzahl nicht verändert, jedoch aber die Länge auf der sie verteilt werden. Dieser Abstand muss ausserdem je nach Anwendung neu bestimmt werden, weil er von der Gesamtanzahl der Bohrungen und dem Schrägstellwinkel abhängt. In Abbildung 31 «Wasserbohrungen bei Waschgütern unterhalb des Wascharmes» ist eine Anordnung der Wasserbohrungen exemplarisch dargestellt. Um die Selbstreinigung des Systems zu verbessern, kann je nach Bedarf eine Wasserbohrung auf das Gehäuse gerichtet werden um dieses aktiv zu reinigen.

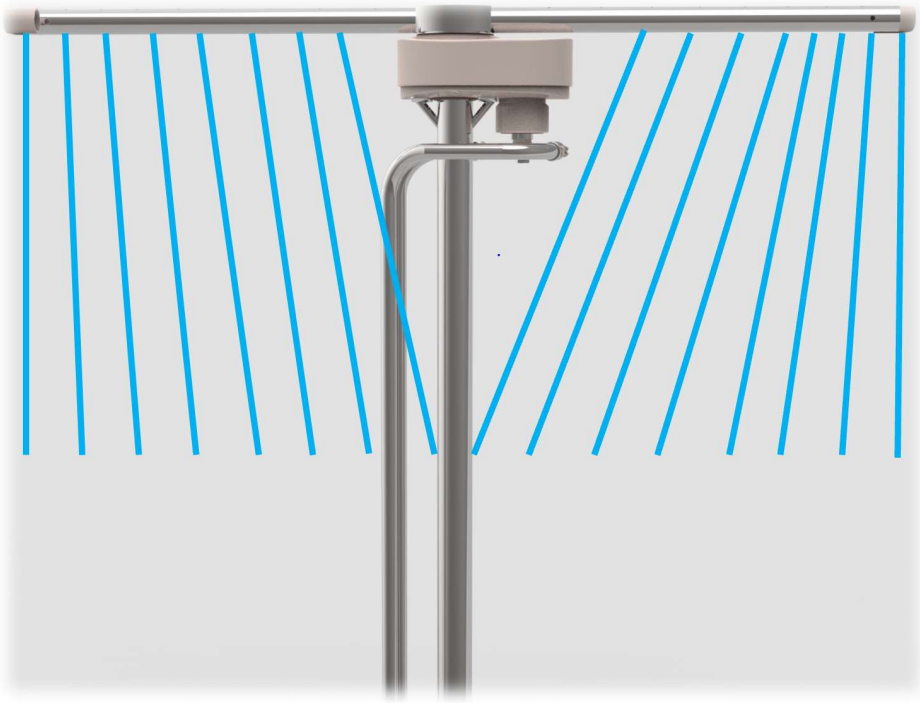


Abbildung 31: Wasserbohrungen bei Waschgütern unterhalb des Wascharmes

12.11 Regelung

Die Drehzahl des Wascharmes soll laut Auftraggeber im Bereich zwischen 25 und 45 U/min mit einer Genauigkeit von ±5% geregelt werden können (siehe Tabelle 1 «Anforderungsliste»). Die Einstellung der Drehzahl erfolgt über den Volumenstrom des Antriebswassers. Dieser Volumenstrom wird pro Drehrichtung mit einem proportionalen Stromventil eingestellt. Angesteuert werden die Proportionalventile von der bereits verbauten elektronischen Steuereinheit der Reinigungsanlage. Der Regler bezieht das Drehzahlsignal des Wascharmes von einem induktiven Zweikanalsensor mit Hilfe von bereits

verbauten Magneten, die am äussersten Punkt des Wascharmes montiert sind (siehe Abbildung 32 «Schematischer Aufbau des Antriebssystems»). Ein induktiver Zweikanalsensor hat den Vorteil, dass nicht nur die Drehzahl des Wascharmes berührungslos detektiert werden kann, sondern auch die Drehrichtung (Noris Automation, 2021). Dies ist insofern wichtig, weil die Drehrichtung des Wascharmes veränderbar ist und sie dadurch überprüft und protokolliert werden kann.

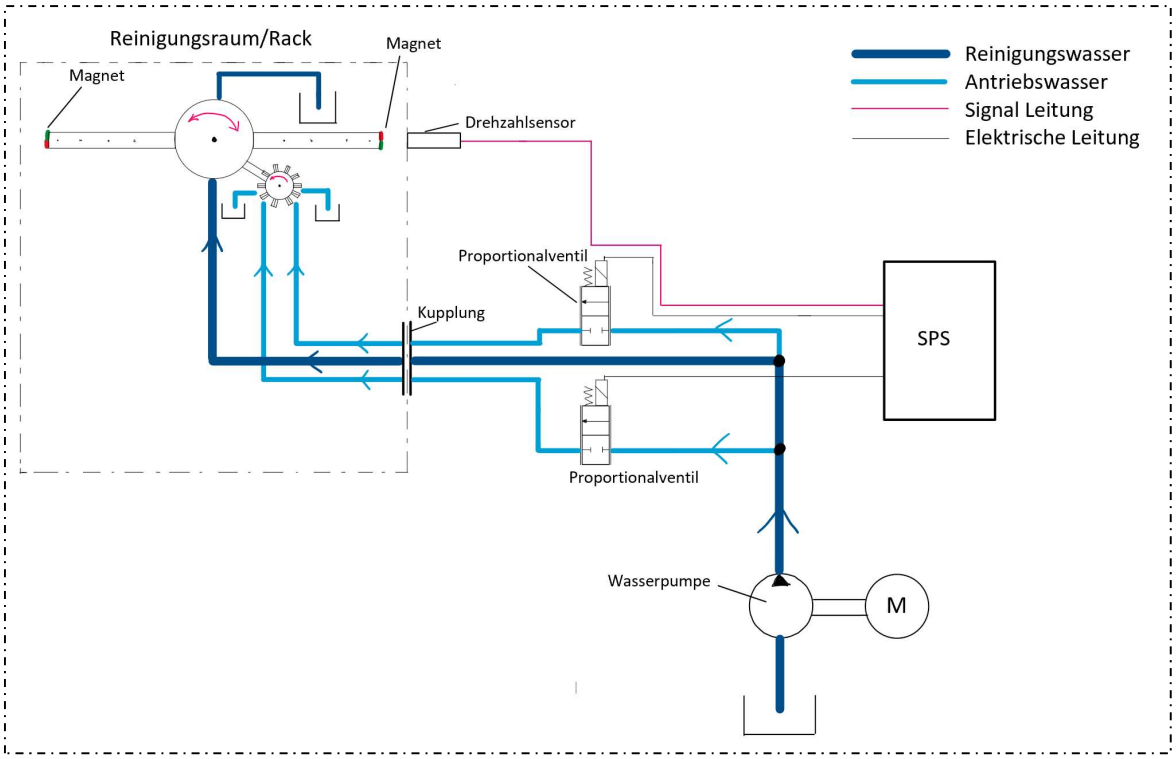


Abbildung 32: Schematischer Aufbau des Antriebssystems

Für einen ersten Regler Entwurf wird ein P-T_2-Regler mit Vorsteuerung empfohlen. Weil die Drehzahldetektion nur zwei Signale pro Umdrehung des Wascharmes generiert, ist eine Regelung bei sehr kleinen Drehzahlen, beispielsweise beim Anfahren, schwierig. Aus diesem Grund wird eine Vorsteuerung implementiert, die den Wascharm beim Anlaufen auf die gewünschte Drehzahl beschleunigt. Ist diese Drehzahl erreicht, übernimmt der P-T_2-Regler dessen genaue Regelung.

Die Signalgrösse der Vorsteuerung wird für jeden Wascharmtyp experimentell ermittelt und dem Regler hinterlegt. Da der Entwurf eines Reglers nicht im Umfang dieser Arbeit enthalten ist, wird dieser nicht weiter vertieft.

12.12 Materialkosten

Bei den Materialkosten handelt es sich grösstenteils um Schätzungen. Die Preise in Tabelle 8 «Preiszusammenstellung» beziehen sich bei PEEK-Kunststoff und Edelstahlteilen allein auf Gewichtspreise des Materials. Die Fertigungskosten der jeweiligen Bauteile sind dabei nicht enthalten. Der Kilopreis von PEEK wird aufgrund von Preisangaben für unterschiedliche Kunststoffplatten der Firma Technoplast Kunststoffe berechnet (Technoplast Kunststoffe, 2021). Die Kosten der Edelstahlrohre, die für die Wasserleitungen verwendet werden und die restlichen Edelstahlpreise stammen aus dem Onlineshop der Firma Debrunner Acifer (Debrunner Acifer, 2021). Die Preise des Planetengetriebes und der Wellendichtringe entsprechen einer Einzellieferung. Bei grösseren Stückzahlen werden die Bauteile laut Gesprächen mit den Lieferanten entsprechend der bezogenen Menge günstiger. Die Normteile werden für das Funktionsmodell vom Online-Versandhändler Amazon bezogen. Wenn diese Teile bei Fachlieferanten bestellt werden, ist ausserdem mit einem kleineren Preis zu rechnen. Unter dem Namen Normteile sind Sicherungsringe, Rillenkugellager, Schrauben etc. zu verstehen. Bei den Wasserdüsen handelt es sich um geschätzte Preise. Bei dieser Zulieferfirma wurde keine Preisanfrage gemacht. In Abbildung 33 «Grafische Darstellung Kostenzusammensetzung» ist die Verteilung der Gesamtkosten auf die einzelnen Bauteile/Materialien grafisch dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Proportionalventile mit Abstand den grössten Anteil der Kosten verursachen.

Tabelle 8: Preiszusammenstellung

Teil	Anzahl	Firma	Preis pro Stück/kg	Preis gesamt
Planetengetriebe	1	Faulhaber	114	114
Wellendichtring	3	NT K+T AG	60	180
PEEK-Kunststoff	0.72 kg		220	158.4
Normteile		Amazon	60	60
Edelstahlrohre	2	Debrunner Acifer	4.95	9.9
Edelstahlteile	2.1 kg	Debrunner Acifer	20	42
Wasserdüsen	4		30	120
Ventile	2		200	400
Summe				**1084.3**

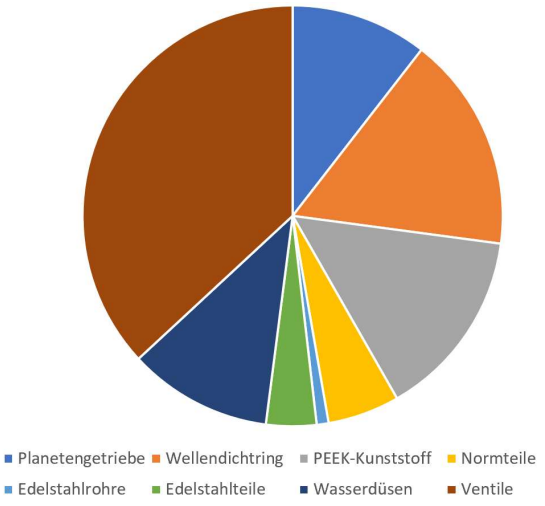


Abbildung 33: Grafische Darstellung Kostenzusammensetzung

13 Funktionsmodell

Mit Hilfe des Funktionsmodells können die Anforderungen aus der Anforderungsliste getestet werden. Der Bau eines Funktionsmodells dient ausserdem zur verbesserten Veranschaulichung des geplanten Systems und zur Aufdeckung möglicher konstruktiver Probleme, die im CAD-Modell nicht klar ersichtlich sind oder an die nicht gedacht wurde. Das Funktionsmodell des Antriebssystems und des Wascharmes wird grösstenteils aus 3D-gedruckten Kunststoffteilen gefertigt. Das beim Druck verwendete Filament besteht aus Polylactide (PLA). Dieses Material gehört zu den Biokunststoffen und ist für den 3D-Druck bestens geeignet (Swissfil, 2021).

Für den Bau von Metallteilen wird normaler Baustahl verwendet. Einige Teile werden nicht exakt so gebaut, wie sie im CAD-Modell gezeichnet sind. Dies liegt daran, dass die Ressourcen für den Bau des Funktionsmodells beschränkt sind und die abgeänderten Teile nicht relevant für die Funktion des Antriebes sind.

13.1 3D-Druck

Alle Teile, die beim Antriebssystem aus PEEK-Kunststoff bestehen, werden mit dem 3D-Drucker hergestellt. Zusätzlich werden einige Teile, die beim realen System aus rostfreiem Stahl gefertigt werden, auch 3D gedruckt. Der verwendete 3D-Drucker des Typs Mega 3S stammt vom Hersteller Anycubic. Das Filament, aus dem die Teile gedruckt werden ist PLA (Polylactide). Dies ist ein biologisch abbaubarer Plastikersatz und eignet sich bestens für den 3D-Druck. PLA ist bis zu einer Temperatur von 55 °C formstabil und hat einen Schmelzbereich zwischen 190 und 220 °C (Swissfil, 2021). Da es sich beim Funktionsmodell nicht um einen Prototypen handelt, der den realen Umgebungstemperaturen ausgesetzt wird, reicht die Temperaturfestigkeit dieses Materials aus.

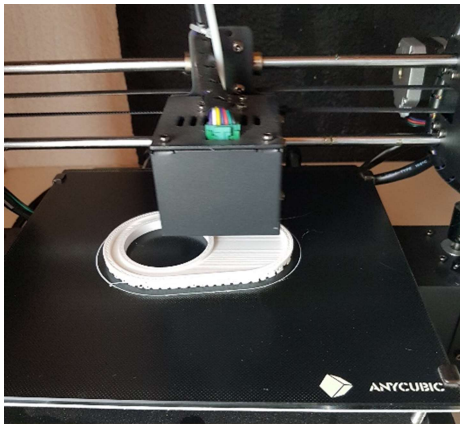


Abbildung 34: 3D-Drucker

Die Teile werden für die Fertigung als STL-Dateien aus dem CAD exportiert. Die Generierung des Druckerprogrammes geschieht durch ein Slicer-Programm mit dem Namen Cura. Dieses Programm stammt von der Firma Ultimaker. Dort können verschiedenste Einstellungen zum Druckvorgang vorgenommen werden. Cura erstellt aus der STL-Datei eine G-Code-Datei, welche die Fahrbefehle für den 3D-Drucker beinhaltet. Diese G-Code-Datei wird auf den Drucker geladen und anschliessend wie in Abbildung 34 «3D-Drucker» ausgeführt.

13.2 Metallteile

Aus Metall werden das Steigrohr, die Wasserleitungen für den Antrieb, die Welle und die Halter des Gehäuses hergestellt. Dafür wird normaler Baustahl verwendet. Die Welle wird mit einer Drehbank auf die richtige Grösse und Durchmesser gedreht. Die Leitungen werden als 10x1 mm Stahlleitungen gekauft, gebogen und verschweisst. Die Halter des Getriebes entstehen aus jeweils einem Rundstahl und einem gebogenen Flachstahl. Alle Metallteile werden selber hergestellt.

13.3 Zusammenbau

Der Zusammenbau des Funktionsmodells funktioniert gut. Die Teile passen wie geplant zusammen. Das Steigrohr in dem das Reinigungswasser nach oben zum Wascharm geführt wird hat bei dem Funktionsmodell einen kleineren Aussendurchmesser als das Original. Aus diesem Grund wird es an der oberen Seite durch ein 3D-gedrucktes Bauteil auf den richtigen Durchmesser gebracht. In Abbildung 35 «Zusammenbau des Funktionsmodells» sind einige Bauteile des Funktionsmodells abgebildet.

Abbildung 35: Zusammenbau des Funktionsmodells

Die Herstellung der Rohre für das Antriebswasser stellen eine Herausforderung dar. Die erforderliche Geometrie ist aufwändig herzustellen. Für jede Drehrichtung müssen zudem zwei Rohre korrekt ausgerichtet und so zusammengeschweisst werden, dass sie dicht sind. Die Halter des Getriebes werden auch geschweisst. Da diese sehr klein sind, erfordert das Zusammenschweissen viel Fingerspitzengefühl. Der Verzug beim Schweissen von kleinen Bauteilen hat zudem einen grossen Einfluss auf die Passgenauigkeit. In Abbildung 37 «Explosionszeichnung» ist eine Explosionszeichnung des gesamten Antriebes zu sehen. Anhand dieser Zeichnung kann die Reihenfolge des Zusammenbaus ungefähr herausgelesen werden. In Abbildung 36 «Zusammengebautes Funktionsmodell» ist das fertig zusammengebaute Funktionsmodell zu sehen.

Abbildung 36: Zusammengebautes Funktionsmodell

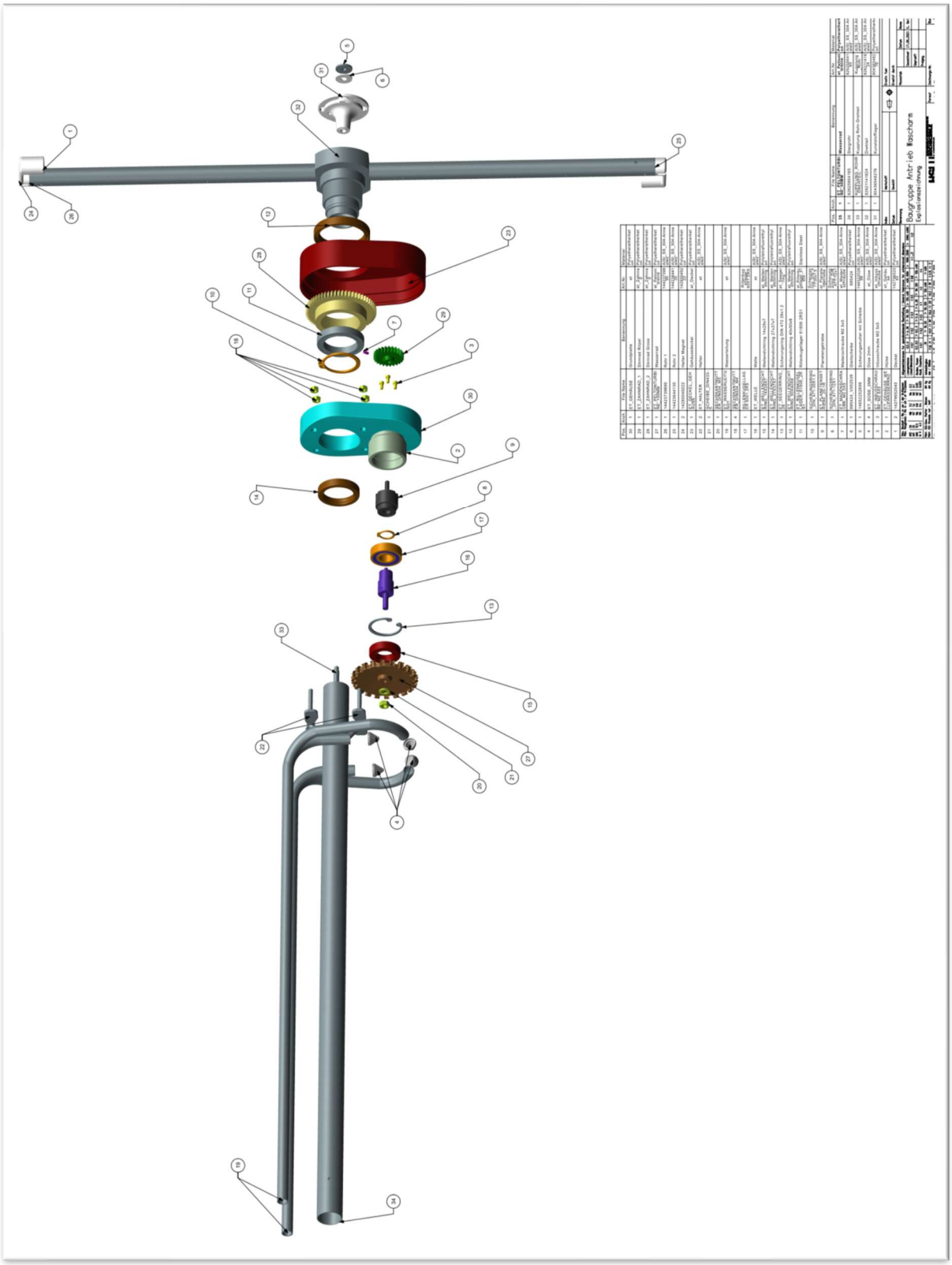


Abbildung 37: Explosionszeichnung

13.4 Probleme

Der Zusammenbau des Funktionsmodells geschieht grösstenteils ohne Probleme. Die grössten Probleme bereiten die Wellendichtringe. Diese passen zwar einwandfrei, haben aber jeweils einen um ca. 1 mm kleineren Innendurchmesser als die abzudichtende Welle. Dies führt zu einer Vorspannung der Dichtlippen von 1 mm im Durchmesser und somit zu einer hohen Reibung, da diese für die Versuchszwecke nicht aus PTFE sondern aus NBR bestehen. Diese Reibung führt zu hohen Verlusten im Antriebsstrang. In einem ersten Schritt wird daher die Schlauchfeder bei allen Wellendichtringen demontiert (siehe Abbildung 38 «Wellendichtring»). Die Schlauchfeder wird normalerweise benötigt um den Anpressdruck der Dichtlippen auf die drehende Welle zu erhöhen. Da das abzudichtende Medium keinen Überdruck gegenüber dem Inneren des Getriebegehäuses erfährt, reicht eine kleine Anpresskraft der Dichtung. Das Entfernen dieser Schlauchfedern bringt jeweils eine deutlich reduzierte Anpresskraft und damit kleinere Reibung. Die Versuche mit dem Funktionsmodell werden erstmals ohne Schlauchfedern in den Wellendichtringen durchgeführt. Wenn die Reibverluste immer noch zu gross sind, werden die Dichtlippen entfernt, auf denen normalerweise die Schlauchfedern montiert sind. Die Abdichtung findet in diesem Fall ausschliesslich durch die Staublippe des Wellendichtringes statt. Dies sollte reichen, da der Druck im Waschraum gleich gross wie im Getriebegehäuse ist und daher keine grosse Belastung auf den Dichtring wirkt. Die Versuche werden zeigen, ob dies wie geplant funktioniert.

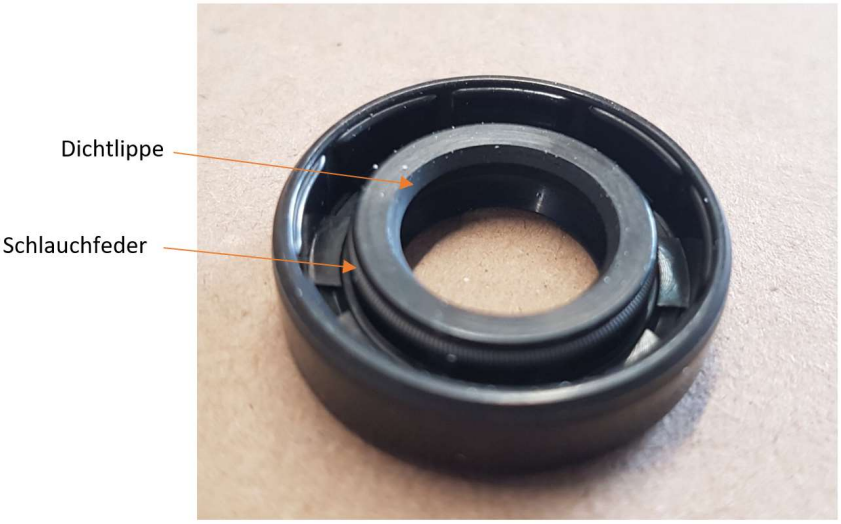


Abbildung 38: Wellendichtring

Einen hohen Reibwiderstand weist auch das Rillenkugellager 61806-2RS1 aufgrund der Dichtungen auf (siehe Abbildung 39 «Dichtung Rillenkugellager 61806-2RS1»). Der Widerstand ist so gross, dass das Lager statt über die Kugeln am äusseren Lagersitz dreht. Dies ist sehr ungünstig, da der Lagersitz durch die Reibung immer grösser wird und seine Funktion verliert. Aus diesem Grund werden die beiden

Dichtungen entfernt. Das Lager dreht ohne die Dichtungen auf den Kugeln und der Lagersitz ist somit langfristig geschützt.

Abbildung 39: Dichtung Rillenkugellager 61806-2RS1

Die beiden Planetensätze im Planetengetriebe besitzen keine axiale Sicherung. Durch die vertikale Montageposition fallen diese durch ihr Eigengewicht nach unten. Da zwischen dem Sonnenrad des ersten Planetensatzes, das mit der Welle verbunden ist (siehe Abbildung 40 «Montage einer Stützscheibe») und den Planetenrädern ein Spiel von rund 1.5 mm vorliegt, verschieben sich die beiden Planetensätze im Inneren des Planetengetriebes um diese Distanz nach unten. Um dieser Verschiebung entgegenzuwirken, wird eine Kunststoff Distanzscheibe auf die Welle montiert (siehe Abbildung 40 «Montage einer Distanzscheibe»). Diese Scheibe hat die Aufgabe, die Planetensätze in ihrer axialen Position zu halten.

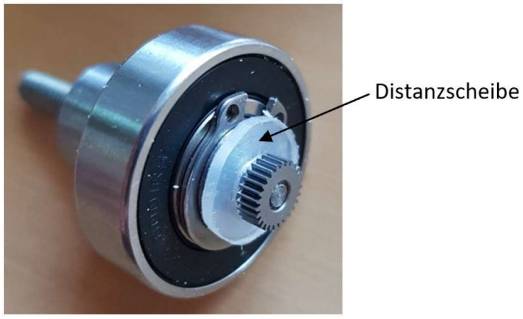


Abbildung 40: Montage einer Distanzscheibe

13.5 Test

Ein Test des Funktionsmodells kann bis zum Ende der vorliegenden Projektdokumentation nicht durchgeführt werden, weil sich die Lieferung einiger Komponenten zu stark verzögerte und die Zeit dafür nicht mehr reicht. Aus diesem Grund wird ein ausführlicher Testbericht nachträglich bis zur Präsentation dieser Arbeit nachgeliefert.

14 Technische und wirtschaftliche Bewertung

Gemäss der Auslegung des Kontroll- und Antriebssystems funktioniert alles in der Theorie. Verluste aufgrund von Reibung können nur schwer abgeschätzt werden. Dies stellt die grosse Unbekannte dar, die nach Einschätzungen über den erfolgreichen Betrieb des Systems entscheiden. Genaue Hinweise zur Funktionsfähigkeit werden die Tests mit dem Funktionsmodell abschliessend zeigen.

Die Wirtschaftlichkeit des Kontrollsystems kann abschliessend nicht genau bestimmt werden. Durch die Einsparung von Wasser für den Antrieb kann kein Reinigungswasser eingespart werden. Die Reinigungsanlagen arbeiten mit verschiedenen Intervallen in denen mit einer gewissen Menge Frischwasser gearbeitet wird. Dieses Frischwasser wird für die Reinigung so lange herumgepumpt, bis die Zeit für das jeweilige Intervall abläuft. Das Wasser wird dabei jeweils in einem Behälter zwischengespeichert. Durch die Einsparung von Antriebswasser kann eventuell die Wasserpumpe kleiner ausgeführt werden. Dies müssten aber weitere Versuche zeigen, ob dies sinnvoll ist. Einen direkten finanziellen Vorteil entsteht also mit dem entwickelten Kontrollsystem nicht. Es sind andere Faktoren, wie die bessere Kontrolle und Dokumentation des Reinigungsvorgangs sowie dessen Konstanz und Reproduzierbarkeit, die klare Vorteile gegenüber dem alten System hervorbringen.

15 Fazit

Über das gesamte Projekt hinweg kann ein durchaus positives Fazit gezogen werden. Es konnte aus der vorhandenen Problemstellung ein Konzept entwickelt werden, das zumindest in der Theorie funktioniert. Die Tests, welche im Anschluss an die Abgabe dieser Dokumentation durchgeführt werden, sollen zeigen wo noch Schwachstellen bestehen und optimiert werden muss.

Die Auswahl des besten Lösungskonzeptes hat mehr Zeit in Anspruch genommen als geplant. Dies ist mitunter ein Grund, warum die Tests nachträglich durchgeführt werden. Ansonsten konnte der Zeitplan gut eingehalten werden. Die Kommunikation mit Vertretern der Firma Belimed Life Science funktionierte sehr gut. Es konnten viele neue Erfahrungen gesammelt werden. Es war auch sehr spannend zu sehen, wie der Berufsalltag in einem Industriebetrieb aussieht und welche Anforderungen gestellt werden. Bei der Kommunikation während den Meetings mit dem betreuenden Dozenten und dem Industriepartner konnte viel Neues gelernt werden. Die Durchführung der Vorversuche stellte sich als sehr positiv heraus. Diese haben geholfen ein Gefühl für die vorherrschenden Kräfte und die Dynamik zu entwickeln. Diese gewonnenen Erkenntnisse wirkten bei der Entwicklung des Konzeptes unterstützend.

Als wichtigstes Kriterium für den erfolgreichen Abschluss eines Projektes müssen mindestens alle Festanforderungen aus der Anforderungsliste erfüllt sein. In Tabelle 9 «Fazit Anforderungsliste» ist die gesamte Anforderungsliste abgebildet. In der Spalte ganz rechts ist ersichtlich, ob die jeweilige Anforderung erfüllt ist. Von den Festanforderungen sind alle erfüllt. Bei den Wunschanforderungen gibt es eine, die nicht erfüllt ist. Es handelt sich um die Forderung, die Drehzahlmessung in das Antriebssystem zu integrieren. Dies ist aufgrund des Antriebes mit Wasser nicht zuverlässig möglich, deshalb wird das bereits verbaute Drehzahlmesssystem verwendet. Die Wunschanforderungen zu den Änderungen und dem maximalen Durchfluss können nicht genau beurteilt werden. Diese Forderungen haben eher einen informativen Zweck.

Tabelle 9: Fazit Anforderungsliste

Auftraggeber Belimed Life Science		Anforderungsliste System zur Kontrolle des Sprüharms in einer Reinigungsanlage		Auftragnehmer Samuel Geisseler	Seite 1/1
Nr.	**Fest / Wunsch**	**Thema**	**Erklärung**	**Geändert**	
1	Fest	Wasserdruck	Der Wasserdruck für die Düsen liegt zwischen 0.8 und 1.7 bar und darf nicht geändert werden.	23.02.2021	Erfüllt
2	Fest	Drehgeschwindigkeit	Die Drehgeschwindigkeit des Sprüharmes muss regelbar sein.	23.02.2021	Erfüllt
3	Fest	Drehgeschwindigkeit	Die Drehgeschwindigkeit der Sprüharme muss auf eine Geschwindigkeit zwischen 25 und 45 U/min ±5% geregelt werden können.	08.03.2021	Erfüllt
4	Wunsch	Regelzeit	Die Zeit für das Erreichen der Solldrehzahl der Sprüharme beträgt maximal 10 Sekunden.	22.03.2021	Erfüllt
5	Fest	Änderungen	Der Wasserströmquerschnitt für das Reinigungsmedium darf nicht kleiner als der Rohrquerschnitt eines 20 mm Rohres (314 mm^2) sein.	08.03.2021	Erfüllt
6	Wunsch	Drehrichtung	Die Drehrichtung des Sprüharmes soll umkerbar sein.	23.02.2021	Erfüllt
7	Wunsch	Änderungen	Es sollte an der bestehenden Maschine so wenig wie möglich geändert werden.	24.02.2021	Erfüllt aber nicht messbar
8	Fest	Material	Alle Komponenten in der Waschkammer, welche mit einem Medium in Kontakt kommen, das danach in der Waschkammer verwendet wird, müssen aus AISI 304, AISI 316L oder einem bereits von der Belimed Life Science verwendeten Kunststoff bestehen.	09.03.2021	Erfüllt
9	Wunsch	Durchfluss	Der Volumenstrom von Reinigungswasser durch einen Wascharm beträgt maximal 5000 l/h.	01.03.2021	Kann nicht beurteilt werden
10	Fest	Temperaturbereich	Der Temperaturbereich des Reinigungsmediums liegt zwischen 15 und 93°C. Bei der Trocknung werden Temperaturen von 120°C erreicht.	08.03.2021	Erfüllt
11	Fest	Medien	Als Reinigungsmedium wird flüssiges Wasser verwendet, das mit Reinigungsmittel versetzt sein kann.	08.03.2021	Erfüllt
12	Fest	Antriebstechnik	Als Energieversorgung zum Antrieb der Wascharme steht elektrischer Strom mit einer Spannung von 400V 50Hz /24V DC, Druckluft mit einem Druck von max 6 bar und Wasser mit einem Druck von 0.8-1.7 bar zur Verfügung.	08.03.2021	Erfüllt
13	Wunsch	Drehzahlmessung	Die Drehzahlmessung sollte wenn möglich in die Antriebstechnik integriert werden.	01.03.2021	Nicht erfüllt

Abschliessend kann das Projekt als erfolgreich betrachtet werden. Es konnten alle Festanforderungen erfüllt werden. Zwei von fünf Wunschanforderungen sind ebenfalls erfüllt.

16 Ausblick

Im Fokus der weiteren Arbeit steht die Durchführung von Tests des Funktionsmodells. Mit diesen Tests kann beurteilt werden, ob die Anforderungen des Auftraggebers Belimed Life Science in der Praxis erfüllt sind. Ausserdem können mit den Tests Vor- und Nachteile der Konstruktion festgestellt werden. Aus den Erkenntnissen der Tests können anschliessend Änderungen an der Konstruktion vorgenommen werden, um allfällige Schwachstellen zu beseitigen.

Bevor ein Prototyp des Antriebs- und Kontrollsystems realisiert werden kann, sind zudem Abklärungen mit Fertigungsspezialisten nötig, damit der Fertigungsaufwand und die damit verbundenen Kosten optimiert werden können. Wenn ein Prototyp gebaut ist, können mit diesem intensive Tests bezüglich der Reinigungsqualität, Regelverhalten, Langlebigkeit, Wartungsaufwand, Prozessoptimierung usw. gemacht werden. Daraus werden wieder neue Erkenntnisse gezogen, die zu einer weiteren Optimierung führen.

17 Schlusswort

Es ist keine leichte Aufgabe ein System zur Kontrolle des Reinigungsarmes in einer Waschanlage zu entwickeln. Es werden viele Anforderungen an das System gestellt. Zumal die Waschgüter sehr strengen Vorschriften bezüglich der Hygiene und Sauberkeit unterliegen. Zudem sind die Störeinflüsse, wie beispielsweise abprallendes Wasser auf den Wascharm während des Reinigungsvorganges sehr unterschiedlich und nur schwer zu reproduzieren. Die Umgebungstemperaturen im Waschraum von bis zu 120 °C schränken die Auswahl geeigneter Komponenten für das geforderte System zusätzlich ein.

Mit dem Antrieb des Wascharmes durch Wasser wird ein System entwickelt, das temperaturbeständig ist, sich durch das herumspritzende Wasser zu einem grossen Teil selbst reinigt und sich durch die hohe Drehzahl des Wasserrades unempfindlich gegen Störeinflüsse verhält. Die ausgewählten Materialien Edelstahl und PEEK-Kunststoff sind bestens für den Einsatz in Reinigungsanlagen geeignet und verfügen über die Zulassung der FDA. Zusätzlich wird bei der Konstruktion des Antriebssystems auf ein hygienisches Design geachtet, sodass nirgends Wasser liegen bleiben kann, das der Vermehrung von unerwünschten Bakterien dient. Mithilfe von Proportionalventilen wird die Menge von Antriebswasser stufenlos geregelt, damit der Wascharm stehts die gewünschte Drehzahl aufweist. Durch die Anordnung der Antriebsdüsen ist ein Reversieren des Wascharmes möglich. Somit sind beide Drehrichtungen während des Reinigungsvorganges gleichwertig möglich. Ein Regler, der die Ist-Drehzahl stehts der Soll-Drehzahl anpasst wird in dieser Arbeit nicht entworfen und ausgelegt. Dies würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, zumal ein vollwertiger Prototyp für dessen Auslegung benötigt wird.

Um die Funktion des Kontrollsystems in der Praxis zu testen, wird ein Funktionsmodell gebaut. Dieses dient ausschliesslich zur Überprüfung der Funktion und dessen Verhalten unter verschiedenen Bedingungen. Aus diesem Grund besteht das Funktionsmodell nicht aus den FDA-zertifizierten Materialien, sondern zu einem grossen Teil aus PLA-Kunststoffteilen, die mit dem 3D-Drucker hergestellt werden und aus handelsüblichem Baustahl. Da sich der Bau des Funktionsmodells zu stark verzögert sind die Tests bis zum Abschluss dieses Dokumentes nicht mehr möglich. Ein ausführlicher Testbericht wird jedoch bis zur Abschlusspräsentation des Projektes nachgereicht.

Bei dem Bau des Funktionsmodells hat sich herausgestellt, dass die Wellendichtringe eine hohe Reibung verursachen. Dies führt zu grossen Verlusten und einer höheren benötigten Energie für den Antrieb, um den Wascharm zuverlässig antreiben zu können. Die Wellendichtringe des Funktionsmodells bestehen aus Kostengründen nicht aus dem dafür vorgesehenen Material PTFE, das über sehr gute Gleiteigenschaften verfügt. Durch eine gezielte Anpassung der Wellendurchmesser und die Verwendung des PTFE-Materials kann der hohen Reibung in einem nächsten Schritt jedoch stark entgegengewirkt werden.

Es bleibt abzuwarten, wie die Testergebnisse mit dem Funktionsmodell ausfallen. Aufgrund dieser Ergebnisse werden Empfehlungen für ein weiteres Ausarbeiten des Systems gemacht. In einer nächsten Phase geht es darum, einen Prototypen zu bauen und das System unter realen Betriebsbedingungen zu testen und einen passenden Regler für die Drehzahl zu entwerfen.

Durch das Projekt und die gute Zusammenarbeit mit der Firma Belimed Life Science konnten viele hilfreiche Erfahrungen gesammelt werden. Es ist zudem ein Konzept entstanden, das ein hohes Potenzial aufweist, sich im Reinigungsanlagenbau einzugliedern. Bis zu einer Serienreife sind jedoch noch einige Schritte und Anpassungen nötig.

18 Literaturverzeichnis

Amsler & Frey AG. (01. 05 2021). Von https://www.amsler-frey.ch/resources/td_peek.pdf abgerufen

Belimed Life Science. (13. 04 2021). Von https://www.belimed-lifescience.com/de/ueber-uns/ abgerufen

Breconcherry. (24. 05 2021). Von www.breconcherry.de abgerufen

Caribou. (02. 06 2021). Von https://caribou3d.com/de/stepper-motoren/301-09-hochtemperatur-schrittmotor.html abgerufen

Debrunner Acifer. (25. 05 2021). Von https://www.d-a.ch/sortiment.cfm?CFID=349379288&CFTOKEN=cd2e9fc8550b8550-6A187F0A-9B84-2AF3-C11768EF7E0C857C&ParentID=18 abgerufen

Der morphologische Kasten. (2009). In H. H. Ulrich Kurz, *Konstruieren, Gestalten, Entwerfen* (S. 16-18). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.

energie.ch. (02. 06 2021). Von https://energie.ch/peltonturbine/ abgerufen

Erstellen der Anforderungsliste. (2009). In H. H. Ulrich Kurz, *Konstruieren, Gestalten, Entwerfen* (S. 30, 31). Wiesbaden: Vieweg+Teubner.

Faulhaber. (07. 05 2021). Von https://www.faulhaber.com/de/produkte/serie/201r/ abgerufen

Filamentworld. (05. 04 2021). Von https://www.filamentworld.de/3d-druck-wissen/was-ist-pla/ abgerufen

Fraunhofer. (07. 06 2021). Von https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Kompetenzen/Reinst--und-Mikroproduktion/Produktflyer_Hygienic_Design.pdf abgerufen

Kobold. (24. 05 2021). Von www.kobold.com abgerufen

Metall Zug. (05. 06 2018). Von https://www.metallzug.ch/medien/medienmitteilungen/metall-zug-gruppe-belimed-life-science-als-eigenstaendiger-geschaeftsbereich abgerufen

Noris Automation. (07. 06 2021). Von https://www.noris-group.com/fileadmin/cms_upload/de/Resources/PR-DMA-DE.pdf abgerufen

Pharmawiki. (28. 05 2021). Von https://www.pharmawiki.ch/wiki/index.php?wiki=Wasser%20f%C3%BCr%20Injektionszwecke abgerufen

Prelon Dichtsystem. (07. 05 2021). Von https://prelon.de/produkte/wellendichtringe-ptfe-standard/ abgerufen

Pure 11. (28. 05 2021). Von https://www.pure11.de/glossar/pw-purified-water abgerufen

Reichelt Chemietechnik GmbH + Co. . (25. 04 2021). Von https://www.rct-online.de/magazin/was-bedeutet-fda-konform/ abgerufen

Solarenergie. (02. 06 2021). Von https://de.solar-energy.technology/erneuerbare-energien/hydraulische-energie/hydraulische-turbinen/pelton-turbine abgerufen

Studienretter. (25. 05 2021). Von https://studienretter.de/nutzwertanalyse/ abgerufen

Swissfil. (13. 05 2021). Von https://www.swissfil.ch/wp-content/uploads/2019/05/TDS_SWISSFIL_PLA_DE_V1.2.pdf abgerufen

Technoplast Kunststoffe. (25. 05 2021). Von https://www.technoplast-onlineshop.de/gruppe,mein_shop,de/Platten,plattenpeek,45201,PEEK-natur abgerufen

Ventile 24. (24. 05 2021). Von https://media.ventile24.de//catalog/product/documents/8396_pim.pdf abgerufen

Anhang

Inhalt

1 Terminplan 4
2 Morphologische Kästen 6
3 Lösungskombinationen 7
3.1 Antrieb Pneumatisch 7
3.2 Antrieb Hydraulisch mit Wasser 11
3.3 Regelung der Drehzahl beim Antrieb mit Fluiden 17
3.4 Antrieb Elektrisch 19
4 Vorversuche 26
4.1 Vorversuchsprotokoll Pneumatik Motor 26
4.2 Vorversuchsprotokoll Störeinflüsse Pneumatik Motor 27
4.3 Vorversuchsprotokoll offenes Wasserrad 28
4.4 Vorversuchsprotokoll Störeinflüsse Wasserrad ohne Gehäuse und ohne Übersetzung 30
4.5 Vorversuchsprotokoll Wasserrad mit Peltonschaufeln, ohne Getriebe mit Schutz vor äusseren Einflüssen 31
4.6 Vorversuchsprotokoll Wasserrad mit Gehäuse 32
4.7 Vorversuchsprotokoll Wasserrad mit Gehäuse ohne Übersetzung Störeinflüsse 34
4.8 Vorversuchsprotokoll Wasserrad mit Getriebeübersetzung 1:4 35
4.9 Vorversuchsprotokoll Wasserrad mit Getriebeübersetzung 1:8 36
4.10 Vorversuchsprotokoll Wasserrad ohne Gehäuse mit Übersetzung Störverhalten 37
4.11 Versuchsprotokoll Volumenstrommessung 38
4.12 Vorversuchsprotokoll Schrittmotor 40
4.13 Vorversuchsprotokoll Störeinflüsse Schrittmotor 42
5 Datenblätter 43
5.1 Schrittmotor 44
5.2 Schrittmotorentreiber 46
5.3 Arduino UNO 55
5.4 Durchflussmessgerät 59
5.5 Wasserdüsen 62
5.6 Proportionalventil 63
5.7 Planetengetriebe 65
5.8 Rillenkugellager W 61806-2RS1 66
5.9 Rillenkugellager W 6001-2RSL 69
6 Zahnradberechnung mit KISSsoft 72

7 Werkstoffe 80
7.1 PEEK 80
7.2 PLA 81
8 Beschlussprotokolle 82
9 Literaturverzeichnis 98

Abbildungsverzeichnis

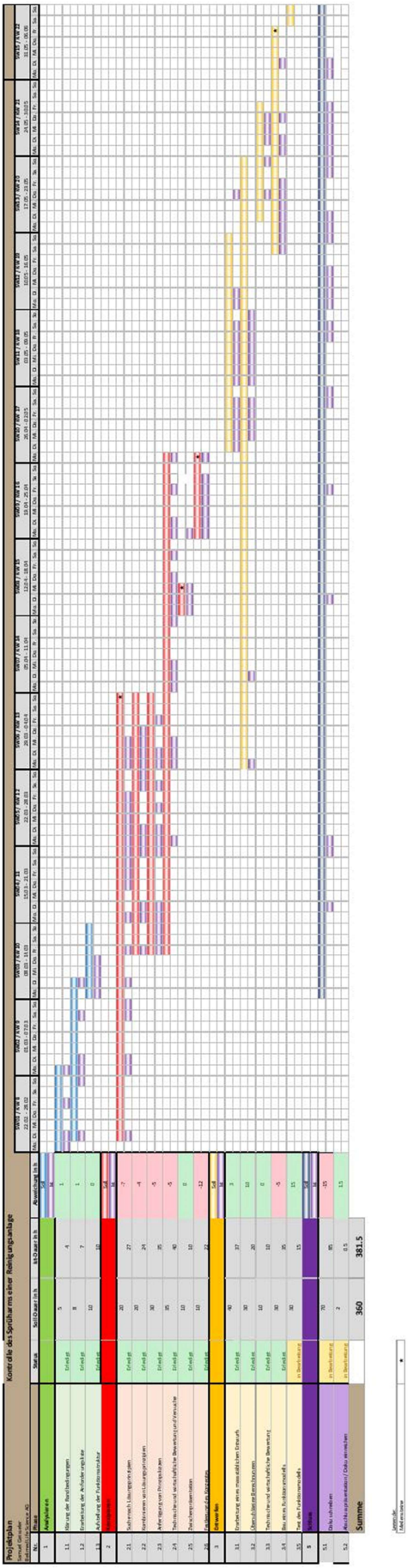
Abbildung 1: Zeichnung gekapselter Pneumatik Motor 8
Abbildung 2: Schema Antrieb mit Pneumatik Motor 8
Abbildung 3: Zeichnung Windrad aussenliegend 9
Abbildung 4: Zeichnung Windrad mit Übersetzung 10
Abbildung 5: Zeichnung Wasserrad ohne Gehäuse 12
Abbildung 6: Schema Wasserrad ohne Gehäuse 12
Abbildung 7: Zeichnung Wasserrad mit Gehäuse 13
Abbildung 8: Schema Wasserrad mit Gehäuse 13
Abbildung 9: Zeichnung Antrieb mit Steuerarmen 14
Abbildung 10: Schnittzeichnung Drehdurchführung 14
Abbildung 11: Schema Antrieb mit Steuerarmen 15
Abbildung 12: Zeichnung Wasserrad mit gekapselter Übersetzung 16
Abbildung 13: Schema Wasserrad ohne Gehäuse mit Übersetzung 16
Abbildung 14: Schema Wasserrad mit Gehäuse und Übersetzung 17
Abbildung 15: Schematische Darstellung Regelung mit Proportionalventilen 18
Abbildung 16: Schematische Darstellung Regelung mit Digitalventilen 19
Abbildung 17: Zeichnung Brushed-Elektromotor mit Kapselung 20
Abbildung 18: Schema Brushed-Elektromotor mit Encoder 20
Abbildung 19: Schema Brushed-Elektromotor ohne Encoder 21
Abbildung 20: Zeichnung Brushless-Elektromotor mit Kapselung 22
Abbildung 21: Schema Brushless-Elektromotor mit Encoder 23
Abbildung 22: Schema Brushless-Elektromotor ohne Encoder 23
Abbildung 23: Zeichnung Schrittmotor mit Kapselung 24
Abbildung 24: Schema Schrittmotor mit Encoder 25
Abbildung 25: Schema Schrittmotor ohne Encoder 25
Abbildung 26: Vorversuch Pneumatik Motor 27
Abbildung 27: Vorversuchsaufbau offenes Wasserrad 29
Abbildung 28: CAD-Zeichnung des Wasserrades mit Peltonschaufeln 30
Abbildung 29: 3D-Modell vom Wasserrad mit Gehäuse 32
Abbildung 30: Wasserräder mit unterschiedlichen Flügeln 33
Abbildung 31: Versuchsaufbau Wasserrad mit Gehäuse 33
Abbildung 32: Versuchsaufbau Wasserrad mit Getriebeübersetzung 35
Abbildung 33: Wasserrad mit Getriebeübersetzung 1:8 36
Abbildung 34: Versuchsaufbau Volumenstrommessung 39
Abbildung 35: Schematischer Anschlussplan Schrittmotor 40
Abbildung 36: Arduino Programm 41
Abbildung 37: Versuchsaufbau Schrittmotor 41

1 Terminplan

Der Terminplan konnte während des gesamten Projektes gut eingehalten werden. Einzig die Festlegung des Konzeptes verzögerte sich, weil sie mehr Zeit in Anspruch genommen hat, als geplant. Die Ist-Dauer in Stunden liegt mit 381.5 leicht über den geplanten 360 Stunden (siehe Tabelle 1 «Projektplan»). Da die Tests des Funktionsmodells noch nicht durchgeführt wurden, werden die Arbeitsstunden noch weiter bis ungefähr 400 Stunden ansteigen.

Über den Verlauf des Projektes wurden vier Meilensteine gesetzt. Diese sind in Tabelle 1 «Projektplan» als Stern symbolisiert. Sie sind die wichtigsten Teilschritte während des Projektes und konnten termingerecht erreicht werden.

Tabelle 1: Projektplan



2 Morphologische Kästen

Um die Ideen aus dem Brainstorming übersichtlich darzustellen werden die möglichen Varianten in verschiedenen morphologischen Kästen dargestellt. Diese Kästen sind in Pneumatik, Wasserhydraulik, Elektrik, Regelung Fluide und Winkel der Düsen verändern eingeteilt.

Tabelle 2: morphologischer Kasten Antrieb pneumatisch

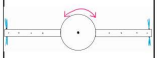
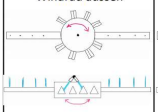
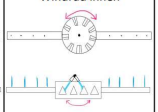
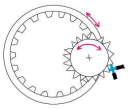
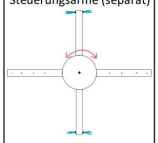
Morphologischer Kasten für die Entwicklung eines Systems zur Kontrolle eines Sprüharms		Antrieb Pneumatisch						
Nr.	Teilfunktion	Lösungsprinzip						
		1	2	3	4	5	6	7
1	Steuerung der Drehzahl	einzeln durchflutbare Düsen 	Pneumatikmotor	Windrad aussen 	Windrad innen 	Windrad und Getriebe 		
2	Regelung der Drehzahl	Mit Fliehkraft Ventil schliessen (Drehzahlbegrenzung)	Druck	Reinigungsarme	Steuerungsarme (separat) 	Strömungswinkel (Impuls)	Volumenstrom	
3	Pneumatik-motor	Radialkolbenmotor	Lamellenmotor	Schrittmotor	Drehkolbenmotor	Turbinenmotor	Zahnradmotor	Keiner

Tabelle 3: morphologischer Kasten Antrieb hydraulisch

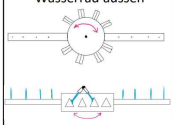
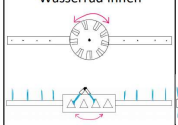
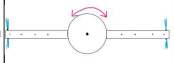
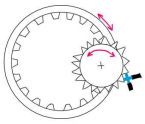
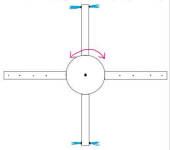
Morphologischer Kasten für die Entwicklung eines Systems zur Kontrolle eines Sprüharms		Antrieb Hydraulisch (Wasser)					
Nr.	Teilfunktion	Lösungsprinzip					
		1	2	3	4	5	6
1	Steuerung der Drehzahl	Volumenstrom Waschdüsen	Wasserrad aussen 	Wasserrad innen 	einzeln durchflutbare Düsen 	Wasserrad und Getriebe 	Wassermotor
2	Regelung der Drehzahl	Mit Fliehkraft Ventil schliessen (Drehzahlbegrenzung)	Druck	Reinigungsarme	Steuerungsarme (separat) 	Strömungswinkel	Volumenstrom

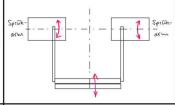
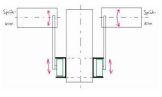
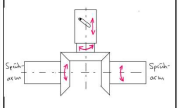
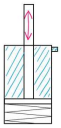
Tabelle 4: morphologischer Kasten Antrieb elektrisch

Morphologischer Kasten für die Entwicklung eines Systems zur Kontrolle eines Sprüharms		Antrieb Elektrisch						
Nr.	Teilfunktion	Lösungsprinzip						
		1	2	3	4	5	6	7
1	Wechsel-strom Motor	Kollektormotor (Reihenschluss)	Asynchronmotor	Keiner				
2	Drehstrom-motor	Synchronmotor	Asynchronmotor	Keiner				
3	Gleichstrom-motor	Permanenterregt mit Bürsten	Permanenterregt ohne Bürsten (Brushless)	Elektrisch erregt Reihenschluss	Elektrisch erregt Nebenschluss	Schrittmotor	Elektrisch Fremderregt	Keiner
4	Steuerung der Drehzahl	Spannung	Strom	Frequenz	Digital			
5	Drehzahler-fassung	Strom	Spannung	Encoder	Sensor Aussen (wie bereits verbaut)	Sensor Innen beim Drehpunkt		
6	Regelung der Drehzahl	Strom	Spannung	Frequenz	Digital			
7	Drehrich-tungserfas-sung (Berührungs-los)	2 Kanal Drehzahlsensor	2 x 1 Kanal Drehzahlsensor	Hallsensor	Induktivsensor	Encoder	Spannung	Strom

Tabelle 5: morphologischer Kasten Regelung Fluide

Morphologischer Kasten für die Entwicklung eines Systems zur Kontrolle eines Sprüharms		Regelung Fluide			
Nr.	Teilfunktion	Lösungsprinzip			
		1	2	3	4
1	Drehzahler-fassung	Aussen (wie bereits verbaut)	Innen beim Drehpunkt	Volumenstrom	Druck
2	Verstellen des Volumen-stroms	Proportionalventil	Ventil mit Servosteuerung	Digital Ventil	Ohne
3	Verstellen des Druckes	Proportionalventil	Digital Ventil	Ohne	
4	Drehrich-tungserfas-sung (Berührungs los)	2 Kanal Hallsensor	2 x 1 Kanal Hallsensor	2 Kanal Induktivsensor	2 x 1 Kanal Induktivsensor

Tabelle 6: morphologischer Kasten Windel der Düsen verändern

Morphologischer Kasten für die Entwicklung eines Systems zur Kontrolle eines Sprüharms		Winkel der Düsen verändern					
Nr.	Teilfunktion	Lösungsprinzip					
		1	2	3	4	5	6
1	Winkel Verstellung	Taumelscheibe (Hubschrauber) 	Zwangsführung mit Rollen 	Kegelradverstellung 			
2	Hub-mechanis-mus	Spindelgetriebe	Wasserzylinder 				
3	Winkel-erfassung	Potentiometer	Drehwinkelsensor (Magnet)	Linearsensor	Näherungsschalter	Drucksensor	Induktivsensor

3 Lösungskombinationen

Aus den morphologischen Kästen werden verschiedene mögliche und machbare Teillösungen miteinander kombiniert. In diesem Kapitel werden diese vorgestellt.

3.1 Antrieb Pneumatisch

Als pneumatische Antriebskonzepte kommen drei Kombinationen in Frage. Eine Variante besteht aus einem Pneumatik-Motor und die anderen beiden aus einem Windrad. Ein Antrieb mit Windrad ist zur Erreichung eines grösseren Antriebsmomentes durch ein Zahnradgetriebe untersetzt. Die Vor- und Nachteilen werden diesem Abschnitt erläutert.

1)

Teilfunktion	**Lösungsprinzip**
Steuerung der Drehzahl	Pneumatik Motor
Regelung der Drehzahl	Volumenstrom
Pneumatik Motor	Lamellenmotor

Die Verzahnung wird aufgrund der schlechten Reinigungsmöglichkeit unter einer abgedichteten Haube platziert (siehe Abbildung 1).

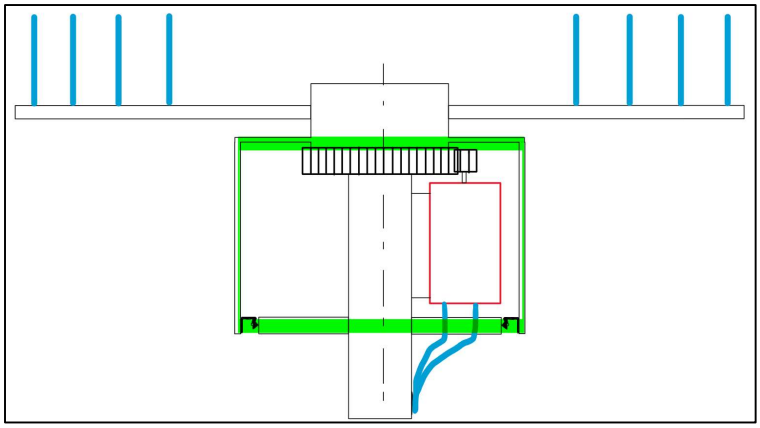


Abbildung 1: Zeichnung gekapselter Pneumatik Motor

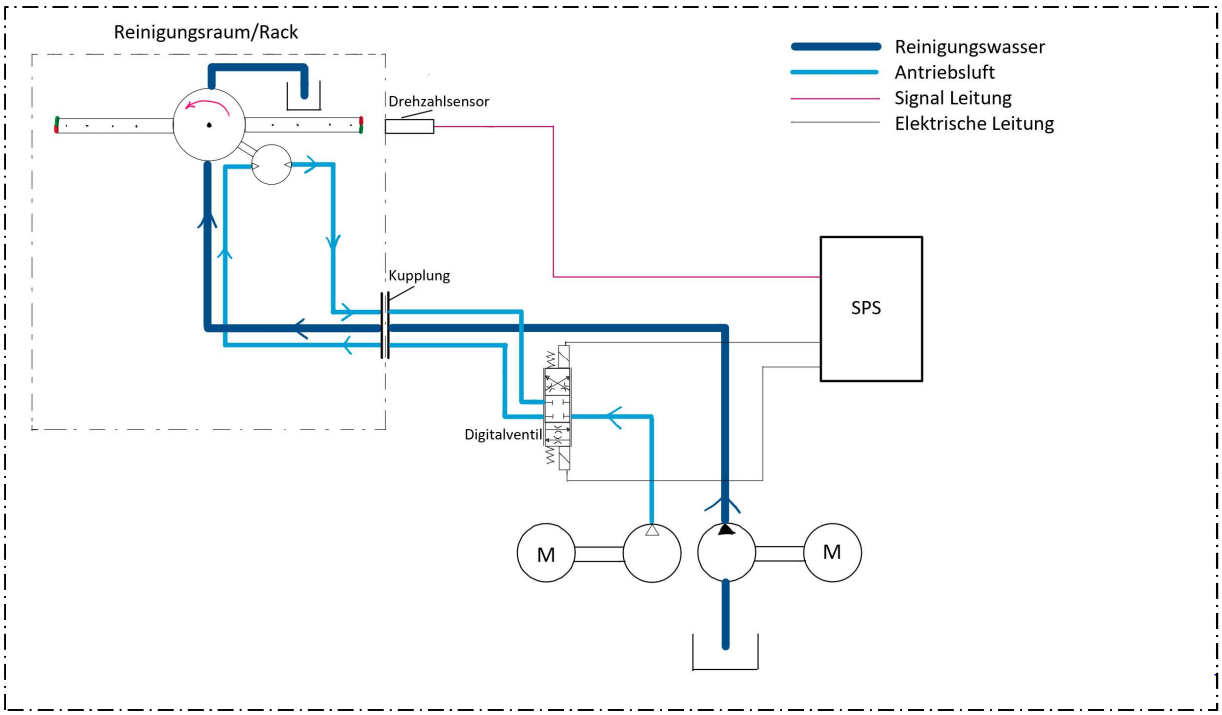


Abbildung 2: Schema Antrieb mit Pneumatik Motor

Vorteile

- **Ohne Schmiermittel möglich**
- **(Luft als Antriebsmittel günstig)**
- **Einfache Regelung**
- **Effiziente Druckluftnutzung**
- **Betrieb in nasser Umgebung möglich**
- **Zwei Drehrichtungen möglich**

Nachteile

- **Hohe Geräuschentwicklung**
- **Getriebeübersetzung nötig**
- **Teuer**
- **Luft muss wieder zurückgeführt werden**

2)

Teilfunktion	**Lösungsprinzip**
Steuerung der Drehzahl	Windrad aussen
Regelung der Drehzahl	Volumenstrom
Pneumatik Motor	Kein Motor

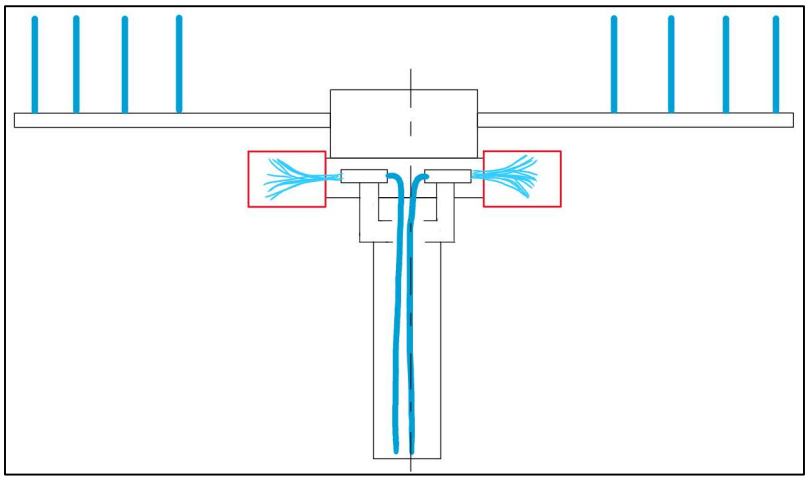


Abbildung 3: Zeichnung Windrad aussenliegend

Vorteile

- **Geringer Konstruktionsaufwand**
- **Sehr wartungsarm**
- **Günstig**

Nachteile

- **Einfluss des Reinigungswassers auf den Antrieb ist schwer einzuschätzen**
- **Kleines Antriebsmoment möglich**
- **Ineffiziente Druckluftnutzung**
- **Hohe Geräuschentwicklung**
- **Hoher Luftverbrauch**
- **Schwer zu regeln**

3)

Teilfunktion	**Lösungsprinzip**
Steuerung der Drehzahl	Windrad mit Getriebe
Regelung der Drehzahl	Volumenstrom
Pneumatik Motor	Kein Motor

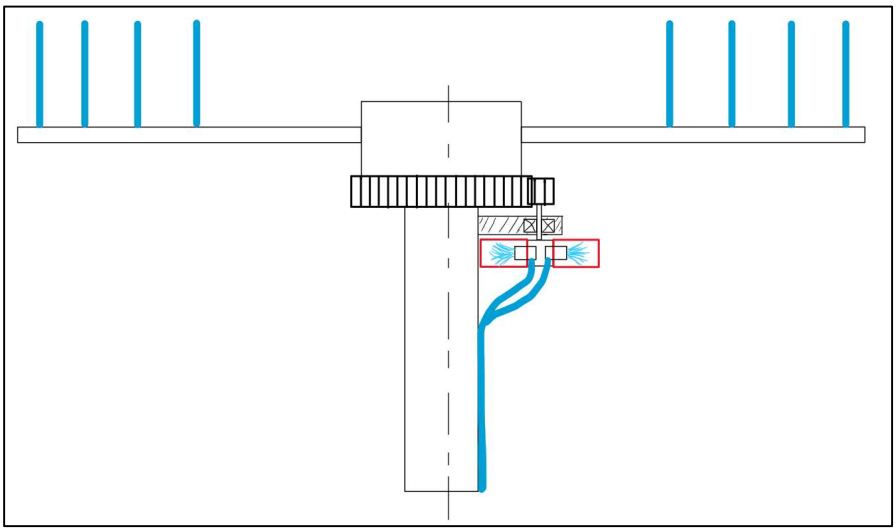


Abbildung 4: Zeichnung Windrad mit Übersetzung

Vorteile

- **Hohes Antriebsmoment möglich**
- **Wartungsarm**
- **Günstig**

Nachteile

- **Einfluss des Reinigungswassers auf den Antrieb ist schwer einzuschätzen**
- **Ineffiziente Druckluftnutzung**
- **Hohe Geräuschentwicklung**
- **Hoher Luftverbrauch**
- **Höherer Konstruktionsaufwand als ohne Getriebe**

3.2 Antrieb Hydraulisch mit Wasser

Für den Antrieb der Reinigungsarme mit Wasser stehen drei mögliche Lösungsvarianten zur Verfügung. Eine dieser Möglichkeiten ist der Antrieb durch ein aussenliegendes Wasserrad, das von Wasser angespült wird. Eine andere Möglichkeit ist der Antrieb durch Wasserdüsen, die an einem jeweils separaten Steuerungsarm montiert sind und die Reinigungsarme durch das herausfliessende Wasser antreiben. Die dritte Möglichkeit ist ein Wasserrad, das von einem Wasserstrahl angetrieben wird und für den Antrieb der Reinigungsarme durch ein Zahnradgetriebe untersetzt wird.

1)

Teilfunktion	**Lösungsprinzip**
Steuerung der Drehzahl	Wasserrad aussen
Regelung der Drehzahl	Volumenstrom

Ohne Gehäuse

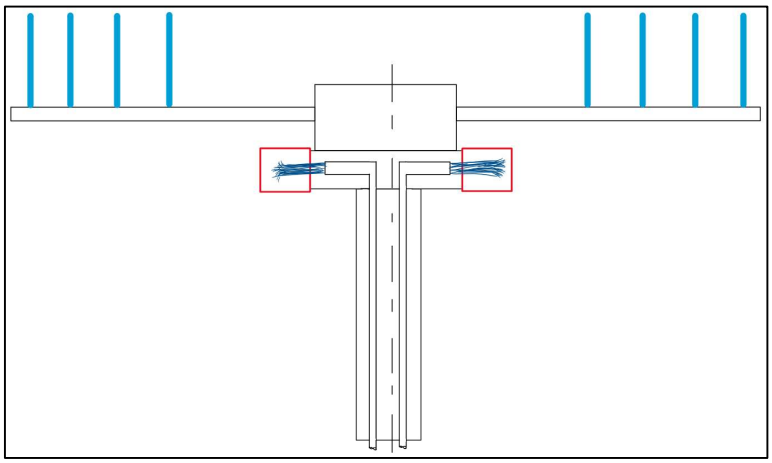


Abbildung 5: Zeichnung Wasserrad ohne Gehäuse

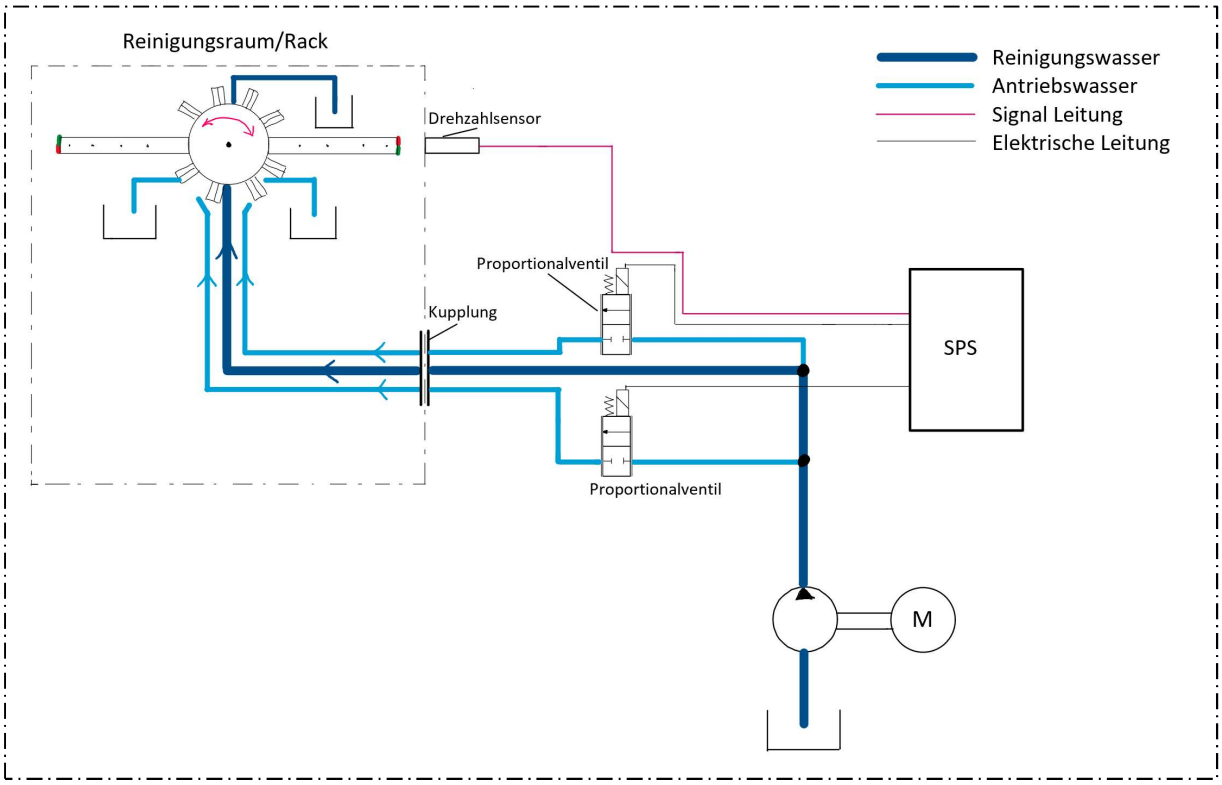


Abbildung 6: Schema Wasserrad ohne Gehäuse

Mit Gehäuse

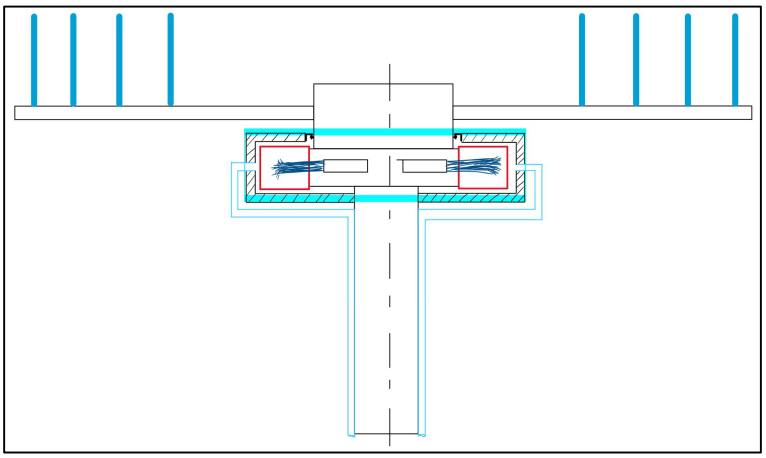


Abbildung 7: Zeichnung Wasserrad mit Gehäuse

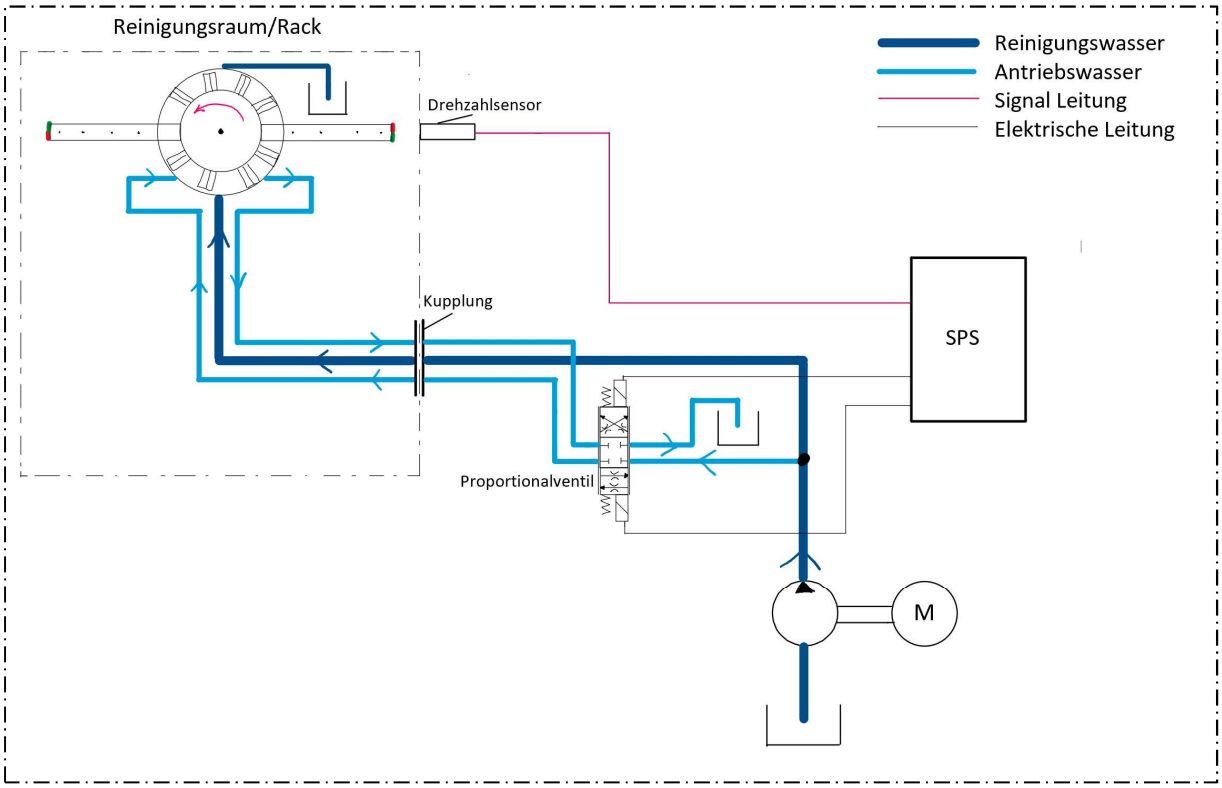


Abbildung 8: Schema Wasserrad mit Gehäuse

Vorteile

- **Einfache Konstruktion**
- **Günstig**
- **Sehr wartungsarm**
- **Effizienter als Druckluft**

Nachteile

- **Hoher Wasserverbrauch**
- **Kleines Antriebsmoment**

2)

Teilfunktion	**Lösungsprinzip**
Steuerung der Drehzahl	Einzeln durchflutbare Düsen
Regelung der Drehzahl	Separate Steuerungsarme

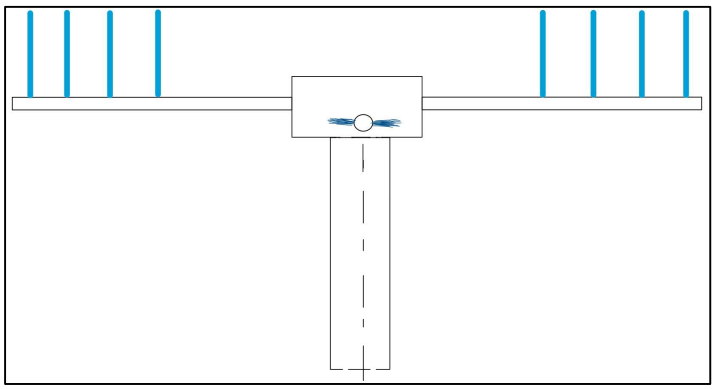


Abbildung 9: Zeichnung Antrieb mit Steuerarmen

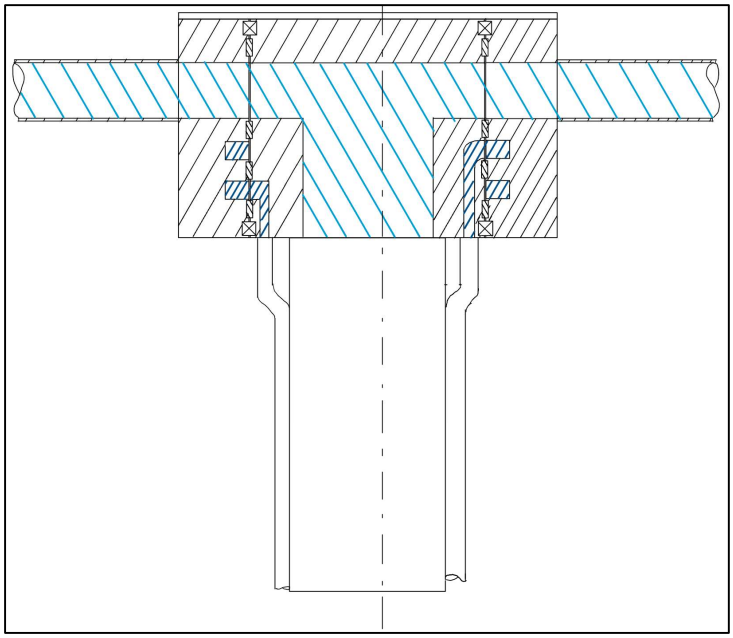


Abbildung 10: Schnittzeichnung Drehdurchführung

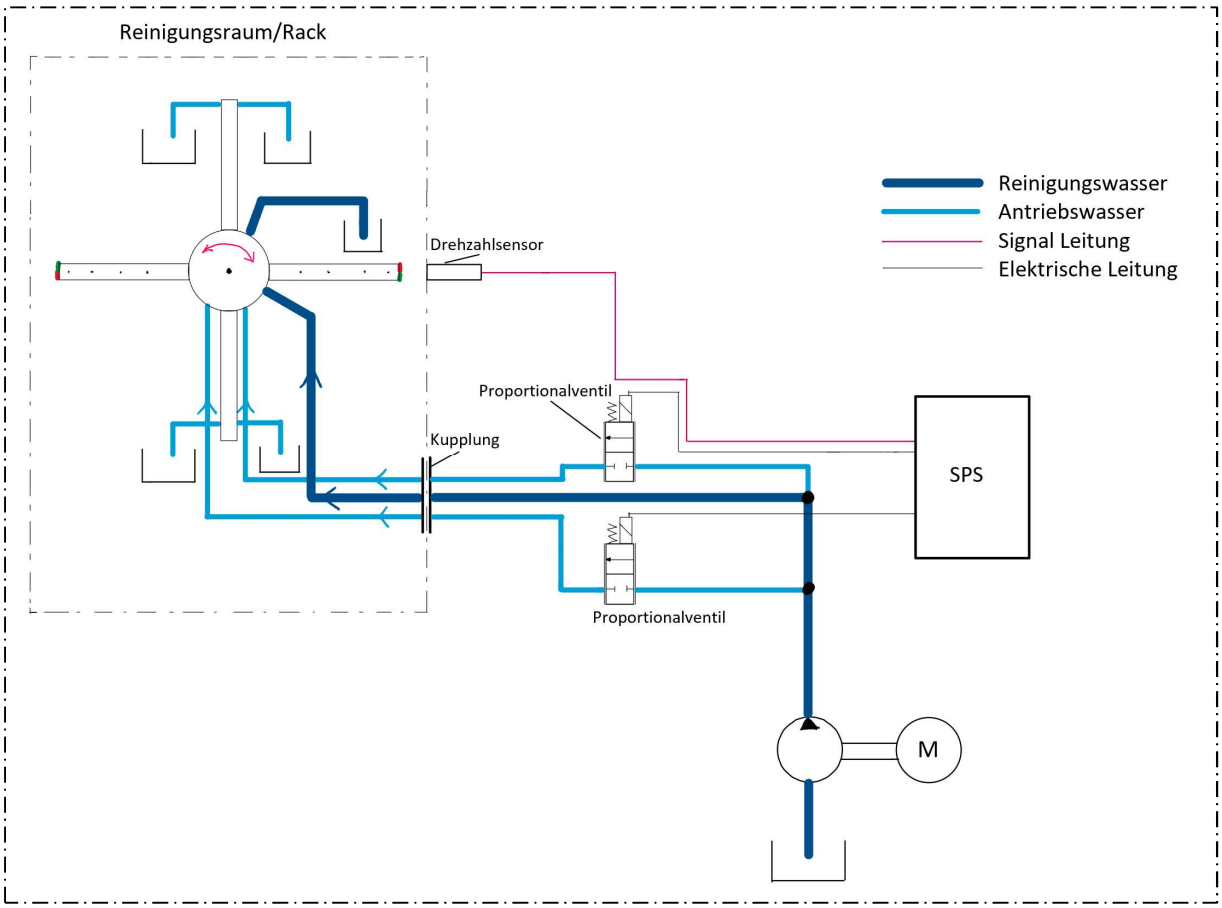


Abbildung 11: Schema Antrieb mit Steuerarmen

Vorteile

- **Kleiner Wasserverbrauch, da Düsen aussen ein grosses Antriebsmoment erzeugen**

Nachteile

- **Hoher konstruktiver Aufwand mit Drehdurchführung**
- **Hoher Wartungsaufwand durch drehende Dichtungen**

3)

Teilfunktion	**Lösungsprinzip**
Steuerung der Drehzahl	Wasserrad mit Getriebe
Regelung der Drehzahl	Volumenstrom

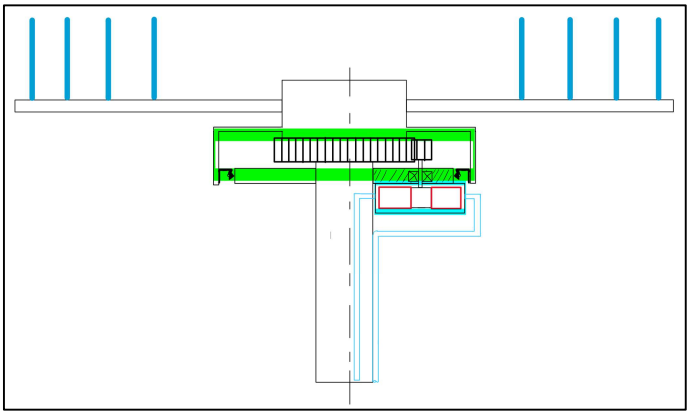


Abbildung 12: Zeichnung Wasserrad mit gekapselter Übersetzung

Antrieb ohne Gehäuse

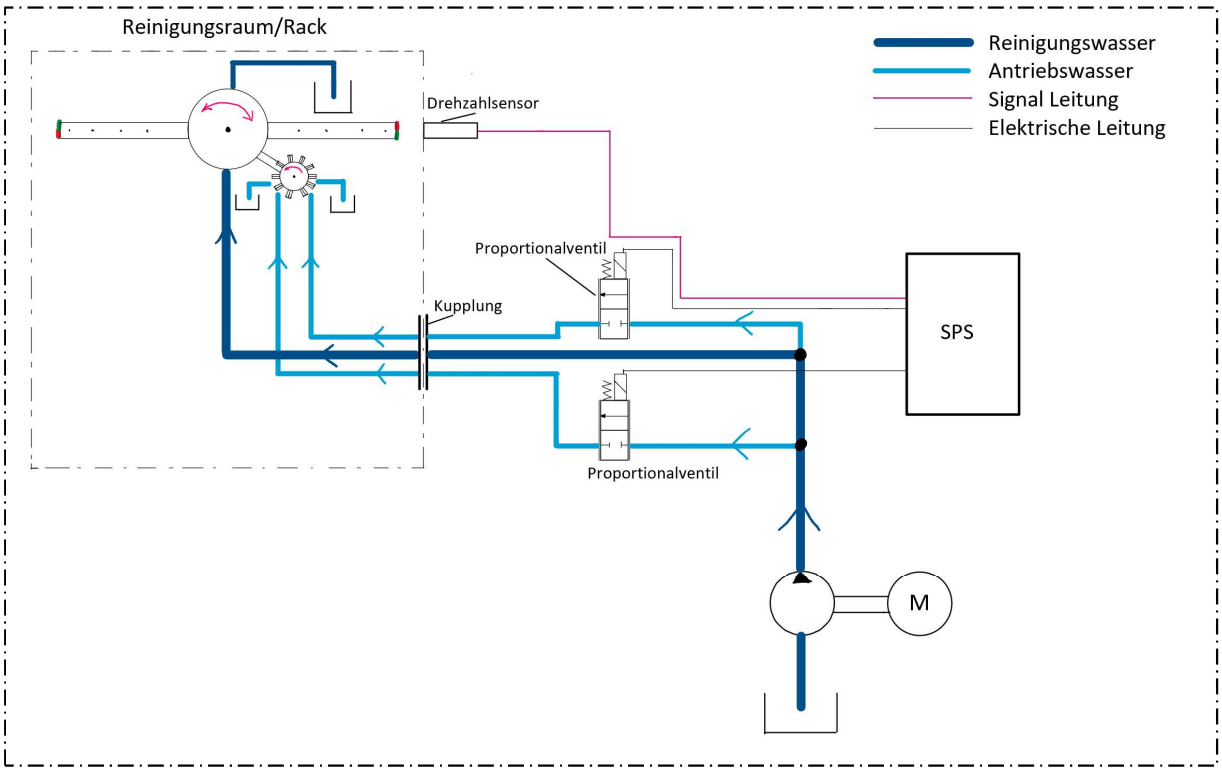


Abbildung 13: Schema Wasserrad ohne Gehäuse mit Übersetzung

Antrieb mit Gehäuse

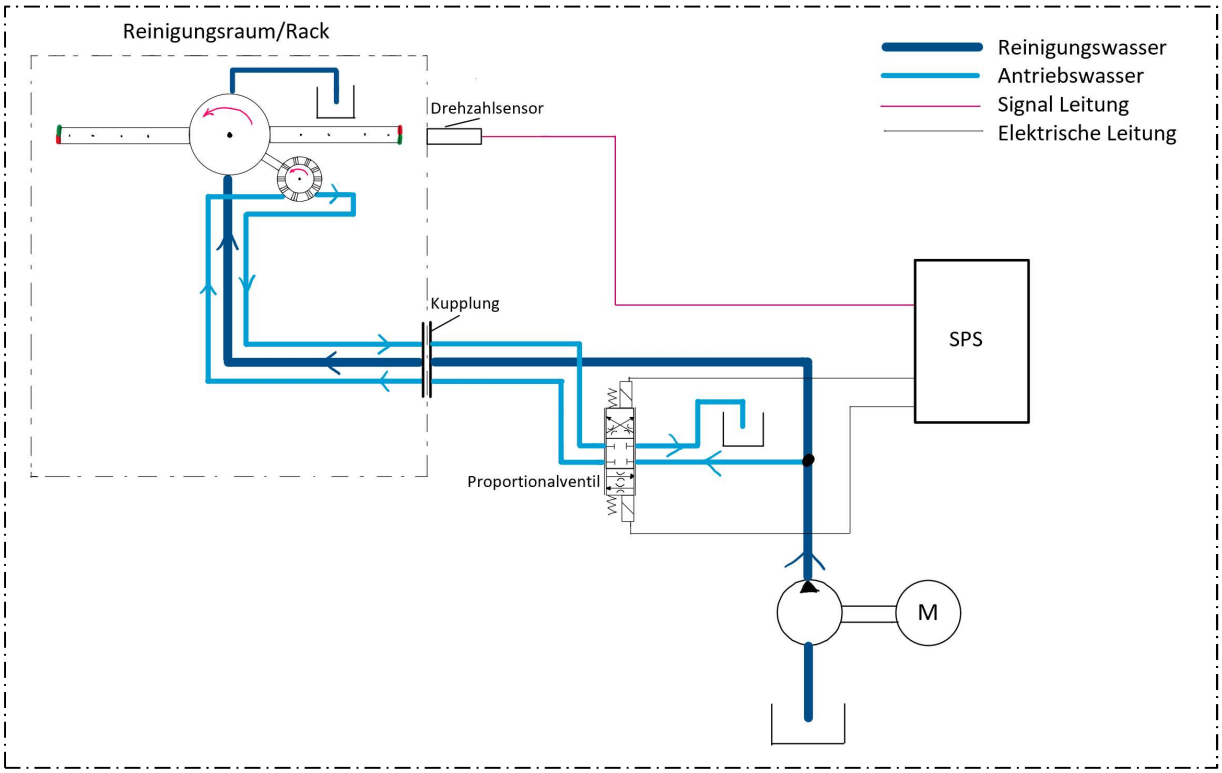


Abbildung 14: Schema Wasserrad mit Gehäuse und Übersetzung

Vorteile

- **Hohes Antriebsmoment möglich**
- **Wartungsarm**
- **Günstig**

Nachteile

- **Höherer konstruktiver Aufwand als ohne Getriebe**
- **Hoher Wasserverbrauch**

3.3 Regelung der Drehzahl beim Antrieb mit Fluiden

Falls ein Antrieb der Reinigungsarme mit Hilfe eines Fluides erfolgt, wird eine zusätzliche Einrichtung benötigt, mit der dessen Drehzahl geregelt werden kann. Als Möglichkeit stehen die Regelung über den Volumenstrom durch ein Proportionalventil oder ein Digitalventil bereit. Zweiteres ist jedoch nur für die Volumenstromregelung bei Pneumatischen Systemen möglich.

1)

Teilfunktion	**Lösungsprinzip**
Drehzahlerfassung	Aussen (wie bereits verbaut)
Verstellen des Volumenstroms	Proportionalventil
Verstellen des Druckes	Ohne
Drehrichtungserfassung (berührungslos)	2 Kanal Induktivsensor

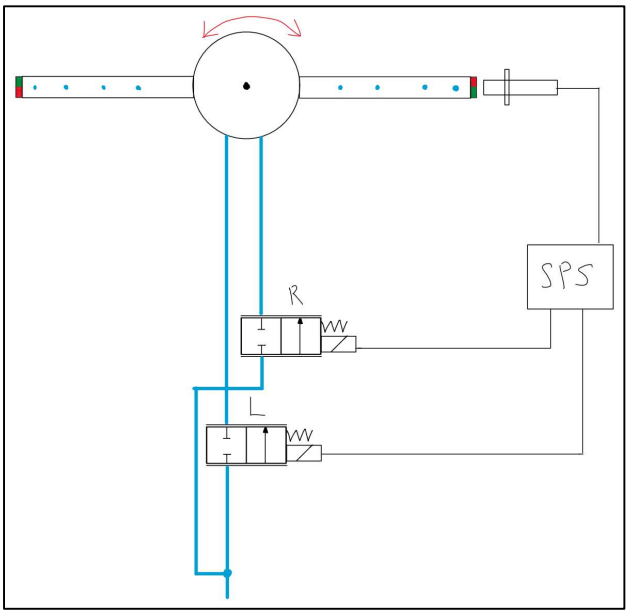


Abbildung 15: Schematische Darstellung Regelung mit Proportionalventilen

Vorteile

- **Geringer konstruktiver Aufwand**

Nachteile

- **Proportionalventil ist teuer**

2)

Teilfunktion	**Lösungsprinzip**
Drehzahlerfassung	Aussen (wie bereits verbaut)
Verstellen des Volumenstroms	Digitalventil
Verstellen des Druckes	Ohne
Drehrichtungserfassung (berührungslos)	2 Kanal Induktivsensor

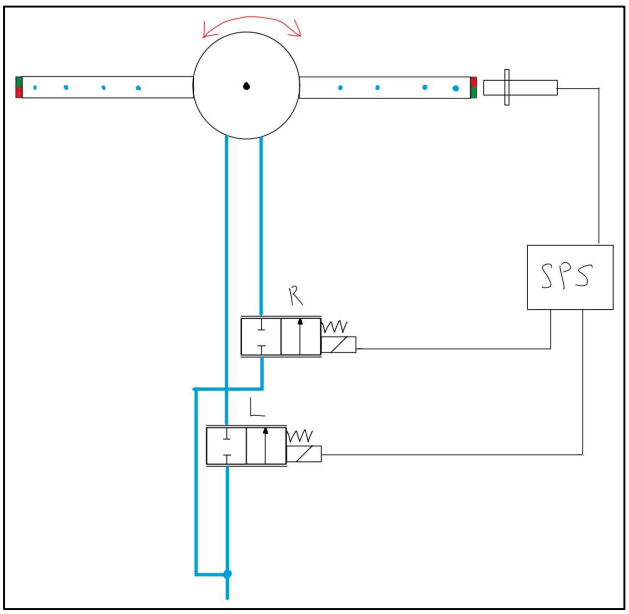


Abbildung 16: Schematische Darstellung Regelung mit Digitalventilen

Vorteile

- **Digitalventile sind günstig (Pneumatik)**
- **Geringer konstruktiver Aufwand**

Nachteile

- **Für Wasser nicht möglich**

3.4 Antrieb Elektrisch

Für den elektrischen Antrieb der Reinigungsarme stehen zwei Lösungskombinationen zur Auswahl. Einerseits ist dies ein Permanenterregter Gleichstrommotor mit Bürsten. Andererseits besteht die Möglichkeit, den Antrieb mit einem bürstenlosen Gleichstrommotor zu realisieren. Die beiden Varianten werden in diesem Unterkapitel mit ihren Vor- und Nachteilen erklärt.

1)

Teilfunktion	**Lösungsprinzip**
Wechselstrommotor	Keiner
Drehstrommotor	Keiner
Gleichstrommotor	Permanenterregt mit Bürsten (Brushed)
Steuerung der Drehzahl	Spannung
Drehzahlerfassung	Encoder
Regelung der Drehzahl	Spannung
Drehrichtungserfassung	Encoder

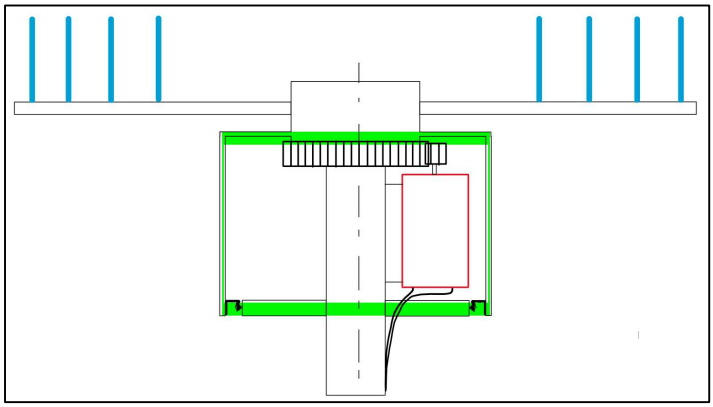


Abbildung 17: Zeichnung Brushed-Elektromotor mit Kapselung

Mit Encoder

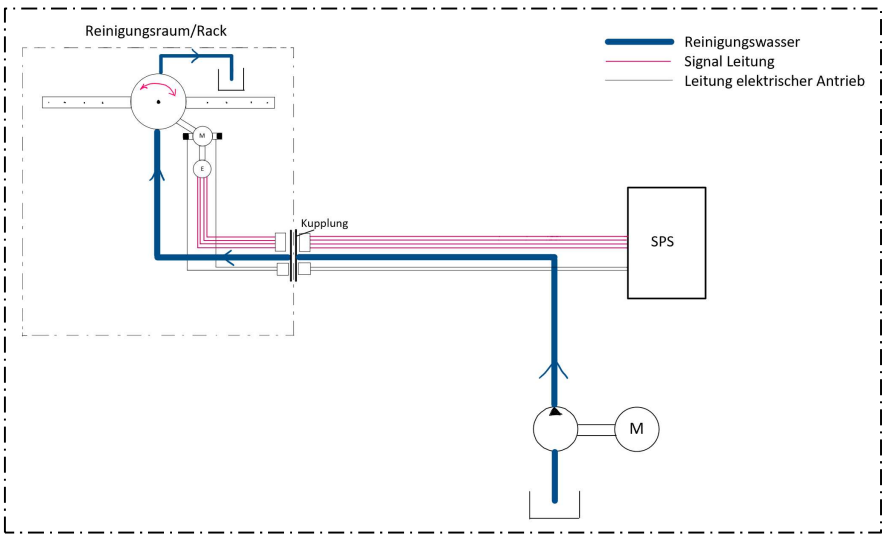


Abbildung 18: Schema Brushed-Elektromotor mit Encoder

Ohne Encoder

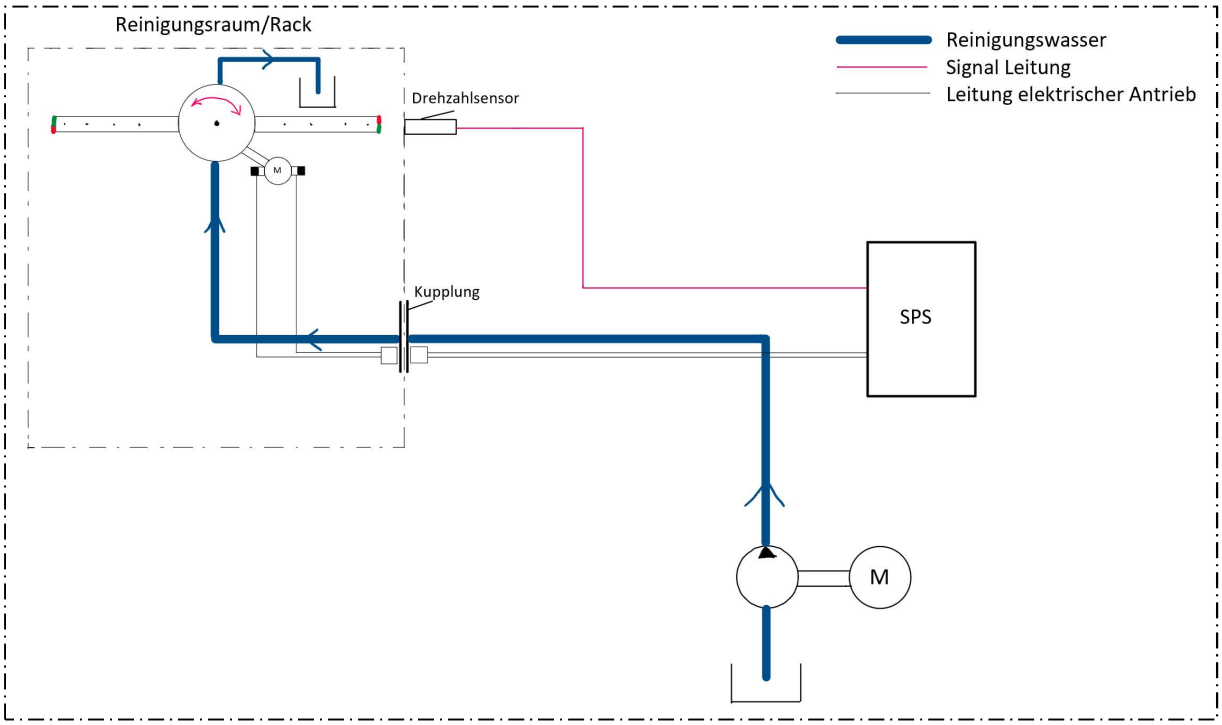


Abbildung 19: Schema Brushed-Elektromotor ohne Encoder

Vorteile

- **Günstiger Motor**
- **Einfache Regelung**
- **Einfache Drehzahl- und Drehrichtungserkennung**

Nachteile

- **Abrieb von Bürsten**
- **Muss vor Wasser geschützt werden**
- **Getriebeübersetzung nötig**

2)

Teilfunktion	**Lösungsprinzip**
Wechselstrommotor	Keiner
Drehstrommotor	Keiner
Gleichstrommotor	Permanenterregt ohne Bürsten (Brushless)
Steuerung der Drehzahl	Frequenz
Drehzahlerfassung	Encoder
Regelung der Drehzahl	Frequenz
Drehrichtungserfassung	Encoder

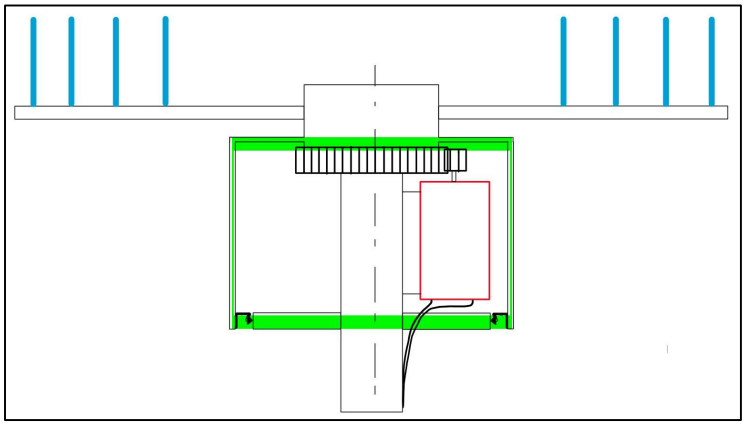


Abbildung 20: Zeichnung Brushless-Elektromotor mit Kapselung

Mit Encoder

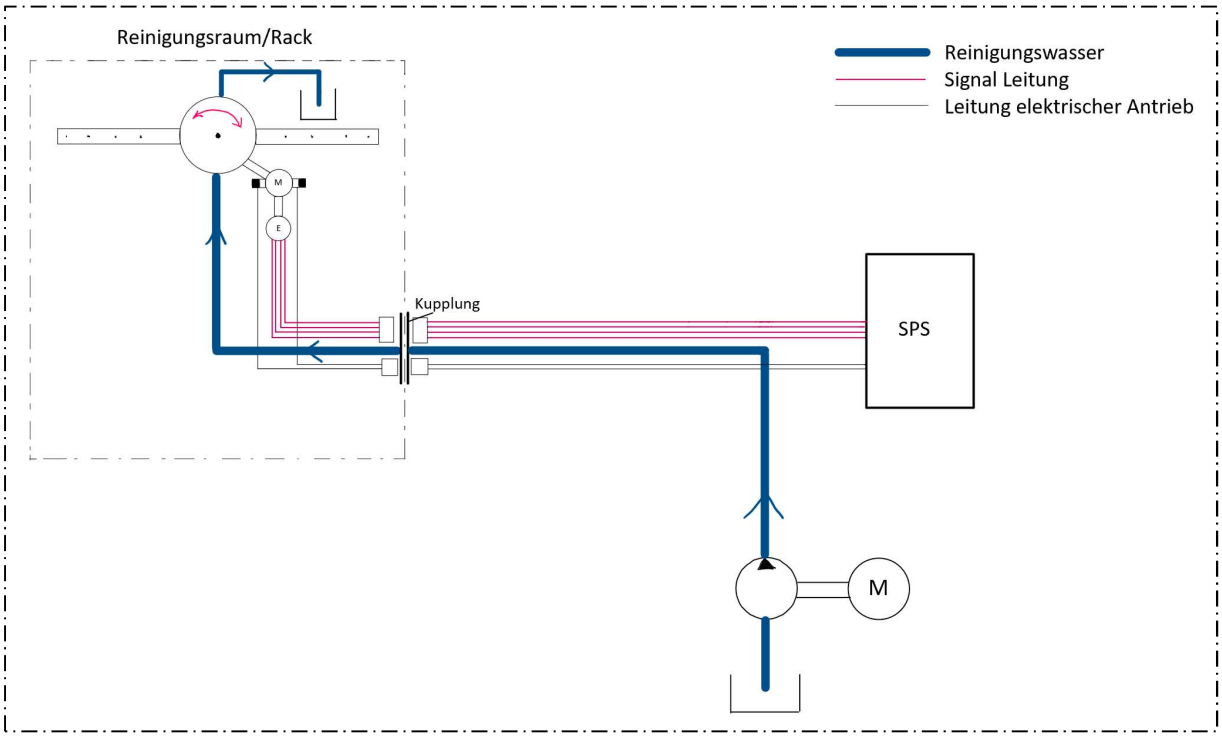


Abbildung 21: Schema Brushless-Elektromotor mit Encoder

Ohne Encoder

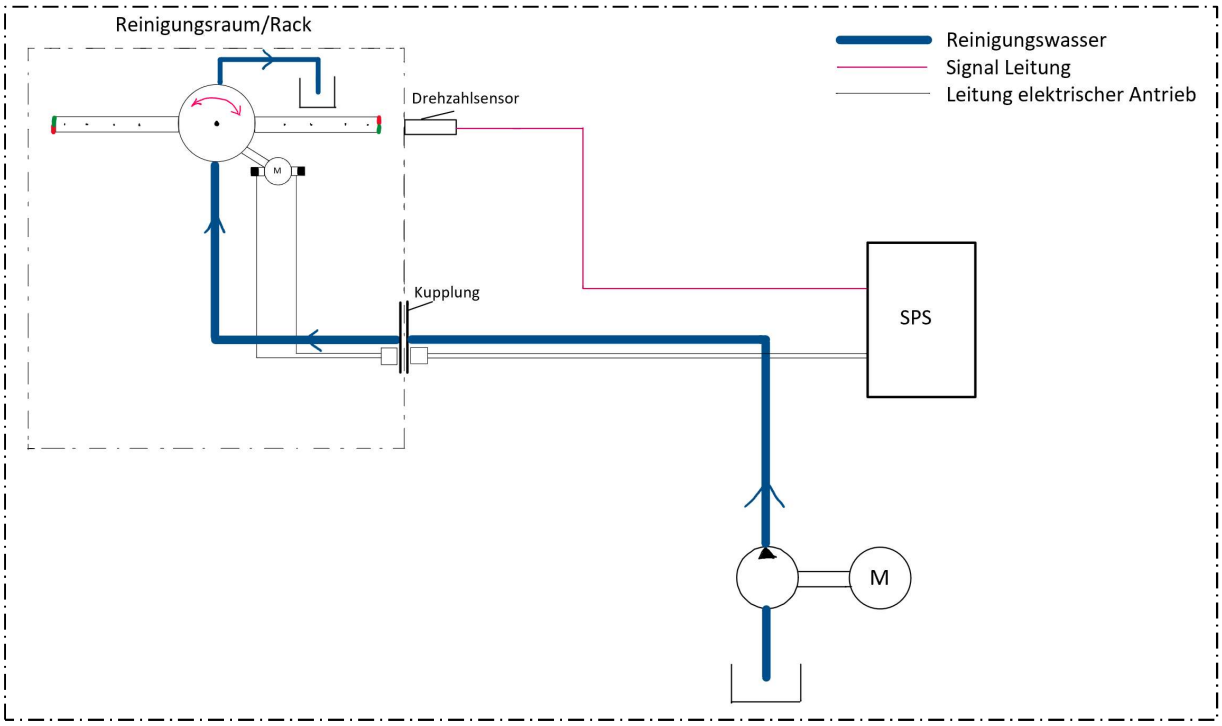


Abbildung 22: Schema Brushless-Elektromotor ohne Encoder

Vorteile

- **Kein Verschleiss von Bürsten**
- **Wartungsarm**
- **Einfache Drehzahl- und Drehrichtungserkennung**

Nachteile

- **Muss vor Wasser geschützt werden**
- **Getriebeübersetzung nötig**
- **Aufwändigere Steuerung und Regelung als Brushed DC**

3)

Teilfunktion	**Lösungsprinzip**
Wechselstrommotor	Keiner
Drehstrommotor	Keiner
Gleichstrommotor	Schrittmotor
Steuerung der Drehzahl	Frequenz
Drehzahlerfassung	Encoder
Regelung der Drehzahl	Frequenz
Drehrichtungserfassung	Encoder

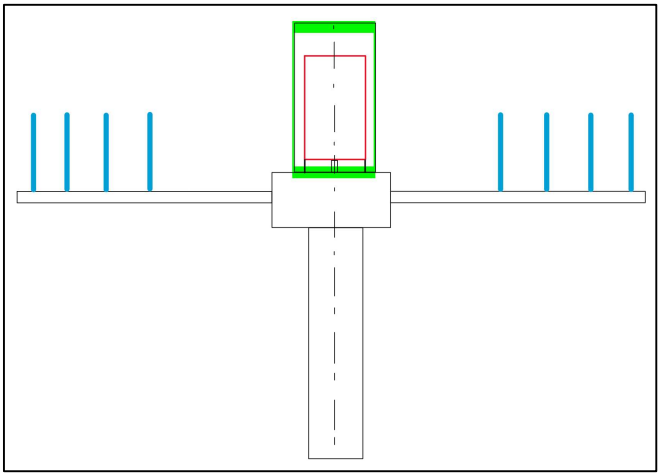


Abbildung 23: Zeichnung Schrittmotor mit Kapselung

Mit Encoder

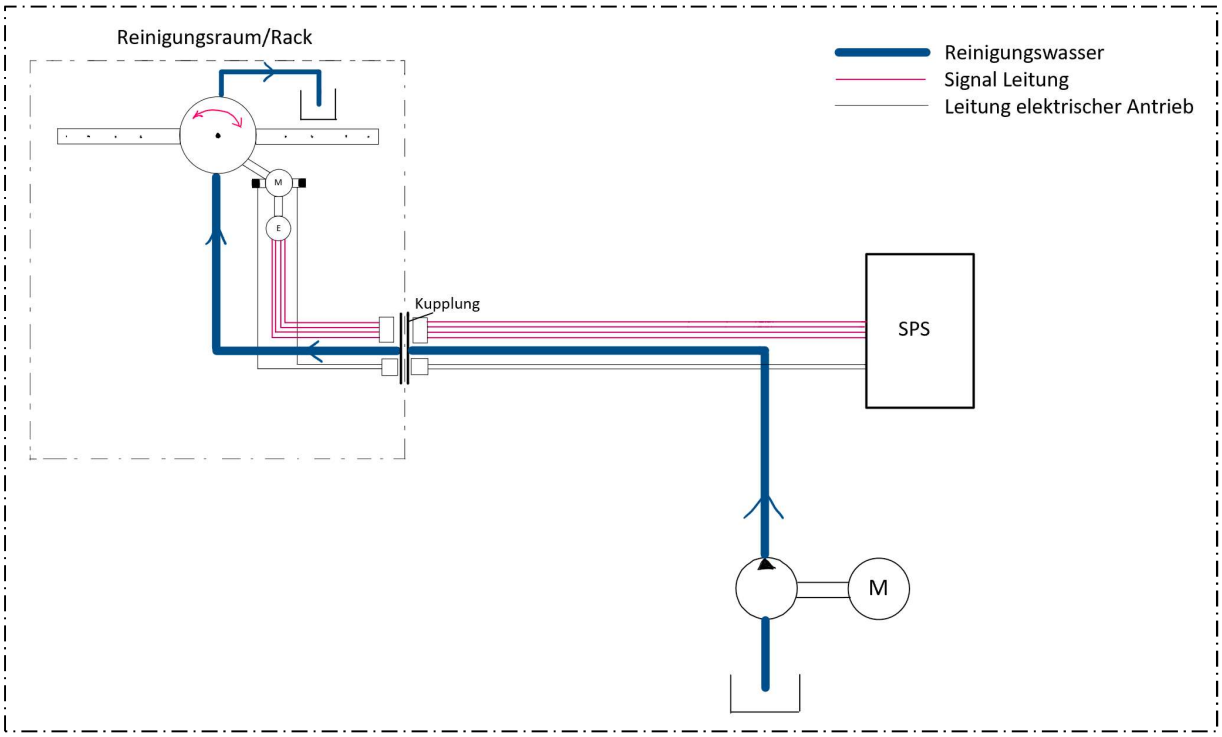


Abbildung 24: Schema Schrittmotor mit Encoder

Ohne Encoder

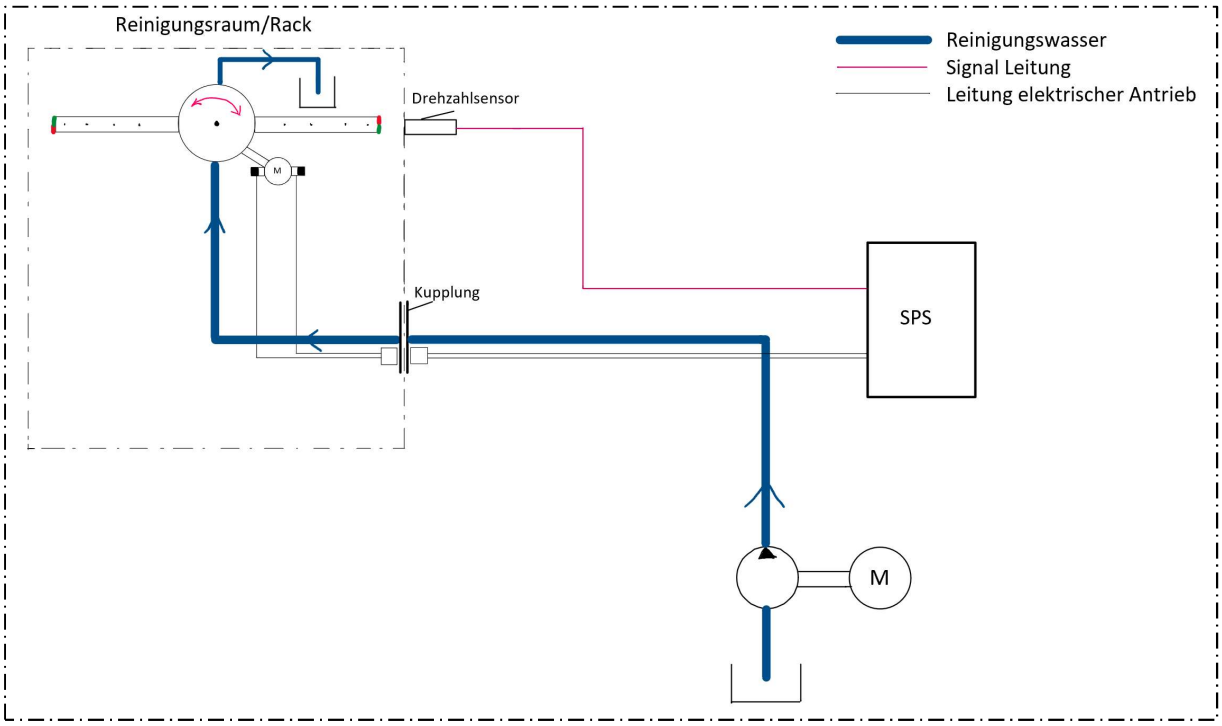


Abbildung 25: Schema Schrittmotor ohne Encoder

Vorteile

- **Kein Verschleiss von Bürsten**
- **Wartungsarm**
- **Einfache Drehzahl- und Drehrichtungserkennung**
- **Keine Übersetzung nötig**

Nachteile

- **Muss vor Wasser geschützt werden**
- **Aufwändigere Steuerung und Regelung als Brushed DC**

4 Vorversuche

Um die verschiedenen Lösungskombinationen besser miteinander zu vergleichen und ihre Vor- und Nachteile herauszufinden, werden Vorversuche durchgeführt. Diese sind in den nachfolgenden Protokollen ausführlich beschrieben.

4.1 Vorversuchsprotokoll Pneumatik Motor

Um das dynamische Verhalten des Wascharmes mit dem Antrieb durch einen Pneumatik Motor zu einzuschätzen und zu beobachten, wird dieser Versuch durchgeführt.

Versuchsaufbau

Als Pneumatik Motor wird ein Handluftschleifer verwendet. Bei diesem wurde der Fräskopf entfernt und durch eine Schraube mit Schaft ersetzt. Der Schraubenschaft wird für den Antrieb des Wascharmes verwendet. Die Energieübertragung geschieht über ein Gummiband, das wie ein Keilriementrieb funktioniert. Der Luftschleifer wird von Hand betätigt. Mit dem Handregler kann die Drehzahl der Motorwelle einfach gesteuert werden. Der Luftschleifer kann leider nur in eine Drehrichtung betrieben werden.

Abbildung 26: Vorversuch Pneumatik Motor

Versuchsdurchführung

Der Luftschleifer wird per Hand vorsichtig betätigt. Dies begünstigt ein langsames Anlaufen des Wascharmes. Die Handbetätigung wird so fest gedrückt, bis die ungefähre Solldrehzahl erreicht ist.

Ergebnisse

Durch ein gefühlvolles Betätigen des Handventils am Luftschleifer können Drehmomentspitzen vermindert werden. Das Ansprechverhalten des Wascharmes auf Drehzahländerungen des Luftschleifers ist sehr gut. Nach dem Ausschalten des Luftschleifers kann der Wascharm seine Drehbewegung langsam und ohne Drehmomentspitzen beenden.

Schlussfolgerung

Mit dem Pneumatik Motor sind gefühlvolle Drehzahlregelungen möglich und das Ansprechverhalten ist gut. Nach dem Ausschalten kann der Wascharm langsam ausdrehen und es kommt zu keiner Drehmomentspitze. Die Drehzahl des Luftschleifers ist für diese Anwendung viel zu gross und müsste stark untersetzt werden. Laut Recherche ist jedoch ein Pneumatik Motor mit einer derart kleinen Antriebsleistung auf dem Markt nicht erhältlich.

4.2 Vorversuchsprotokoll Störeinflüsse Pneumatik Motor

Bei diesem Versuch geht es darum, Störeinflüsse auf das Antriebsverhalten des Druckluftmotors abzuschätzen. Damit kann die Grössenordnung des Einflusses von äusseren Störungen abgeschätzt und mit anderen Antriebssystemen verglichen werden.

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist gleich wie bei dem Vorversuch zum Pneumatik Motor. Der Druckluftmotor wird mit einem Luftschleifer simuliert, dessen Schleifwerkzeug mit einer Schaftschraube ersetzt wird. Diese

Schaftschraube treibt den Wascharm über ein Gummiband, das als Riementrieb funktioniert, an. Die Drehzahl des Pneumatik Motors wird über das am Luftschleifer verbaute Handventil eingestellt.

Versuchsdurchführung

Der Wascharm wird mit Hilfe des Druckluftmotors in Rotation versetzt. Wenn dieser die ungefähre Betriebsdrehzahl von 45 U/min erreicht hat, wird mit der Hand ein Reibmoment auf das Drehteil gebracht. Die Drehzahl wird von Auge geschätzt und kann daher vom Sollwert abweichen. Beim Aufbringen des Bremsmomentes wird der Drehzahlabfall des Waschermes beobachtet. Da das Reibmoment von Hand aufgebracht wird, ist es kaum möglich dessen Betrag abzuschätzen. Bei diesem Versuch geht es nur darum, ein Gefühl für das Störverhalten zu bekommen.

Ergebnisse

Aufgrund des Gummibandantriebes ist der Antriebsstrang sehr elastisch. Durch die geringe Vorspannung des Riementriebes funktioniert dieser bei einem zu grossen Widerstandsmoment als Überlastkupplung. Der Pneumatik Motor kann somit nicht zum Blockieren gebracht werden. Der Riementrieb ist jedoch genügend stark um ein ordentliches Bremsmoment auf den Wascharm zu bringen, ohne dass dieser schleift.

Schlussfolgerung

Störmomente von aussen haben einen sehr geringen Einfluss auf das Drehzahlverhalten des Antriebes mit einem Druckluftmotor.

4.3 Vorversuchsprotokoll offenes Wasserrad

Um das dynamische Verhalten des Waschermes durch den Antrieb eines offenliegenden Wasserrades beobachten zu können, wird dieser Versuch durchgeführt.

Versuchsaufbau

Am Wascharm wird ein Wasserrad mit einem Aussendurchmesser von 80 mm befestigt. Dieses Wasserrad besteht aus 12 freistehenden Flügeln, die mit einem Wasserstrahl besprüht werden. Durch unterschiedliche Anströmwinkel kann das Antriebsmoment und die Drehrichtung verändert werden. Die Wassermenge kann über eine Drehbare Düse stufenlos verstellt werden.

Abbildung 27: Vorversuchsaufbau offenes Wasserrad

Versuchsdurchführung

Der Wasserstrahl wird so direkt wie möglich auf das Wasserrad gerichtet um ein möglichst optimalen Anströmwinkel zu erhalten. Durch verstellen der Wasserdüse kann die Durchflussmenge eingestellt werden. Durch das Anströmen der Wasserradschaufeln von der anderen Seite kann die Drehrichtung des Wascharmes umgedreht werden.

Ergebnisse

Um die Haftreibung des Wascharmes zu überwinden ist eine grosse Wassermenge nötig. Wenn der Wascharm rotiert, wird eine kleinere Wassermenge benötigt um die Drehzahl konstant zu halten. Die Regelung der Drehzahl ist aufgrund der Trägheit des Wascharmes träge. Der Anströmwinkel des Wassers hat einen grossen Einfluss auf das Antriebsmoment. Das Wasser des Antriebes spritzt in alle Richtungen um den Wascharm. Dies kann die Reinigung zusätzlich unterstützen.

Schlussfolgerung

Beim offenen Kreislauf des Antriebswassers hat der Widerstand der Lagerung einen grossen Einfluss auf den Antrieb. Der Anströmwinkel des Wassers hat zudem einen grossen Einfluss auf das Antriebsmoment. Die Regelung der Drehzahl ist aufgrund der Massenträgheit des Wascharmes schwerfällig. Hier könnten weitere Versuche mit dem Wasserrad in einem Gehäuse aufzeigen, ob eine Regelung besser möglich ist.

4.4 Vorversuchsprotokoll Störeinflüsse Wasserrad ohne Gehäuse und ohne Übersetzung

Bei diesem Versuch wird der Einfluss von äusseren Störungen auf die Drehzahl des Wascharmes beobachtet. Dabei wird der Wascharm durch ein direkt montiertes, freiliegendes Wasserrad angetrieben.

Versuchsaufbau

Das Wasserrad ist ein 3D-gedrucktes Bauteil. Dieses wird direkt auf den Wascharm gesteckt und treibt diesen somit ohne Übersetzung direkt an. Es hat einen Aussendurchmesser von 160 mm und verfügt über jeweils 12 Peltonschaufeln pro Drehrichtung. Diese Peltonschaufeln erhöhen die Effizienz des Antriebes mit einem Wasserstrahl, weil der Fluidstrom um 180° umgelenkt wird und somit mehr kinetische Energie für den Antrieb genutzt werden kann. Der Wasserstrahl tritt aus einer Düse mit einem Öffnungsdurchmesser von 2 mm. Der relative Wasserdruck beträgt 1.0 bar. Daraus ergibt sich ein gemessener Volumenstrom von 2.20 l/min. Die Störung wird durch Wasser aus einer Giesskanne simuliert, das von oben auf den Wascharm gespritzt wird.

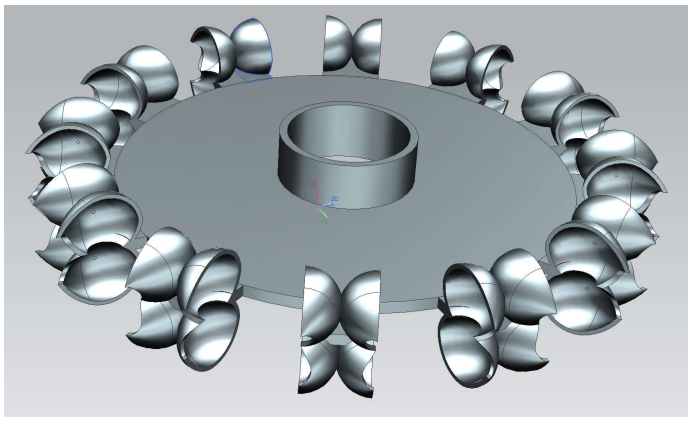


Abbildung 28: CAD-Zeichnung des Wasserrades mit Peltonschaufeln

Versuchsdurchführung

Der Wascharm wird durch den Wasserstrahl und das Wasserrad auf eine Drehzahl zwischen 50 und 60 U/min beschleunigt. Die Drehzahl wird mit einem Laser-Drehzahlmessgerät gemessen. Anschliessend wir Wasser aus einer Giesskanne auf den Wascharm geleert. Dabei wird das Verhalten der Drehzahl des Wascharmes beobachtet.

Ergebnisse

Die Drehzahl des Wascharmes fällt während der Störung des Wassers aus der Giesskanne langsam ab und verringert sich bis zum Stillstand. Nach dem Ende der Störung durch das Wasser beschleunigt der Wascharm wieder auf die Drehzahl zwischen 50 und 60 U/min.

Schlussfolgerung

Der Antrieb mit einem Wasserrad ohne Übersetzung und ohne Gehäuse ist sehr anfällig auf äussere Störeinflüsse. Durch eine Erhöhung des Wasserraddurchmessers und damit des Antriebsmomentes könnten diese Störeinflüsse reduziert werden.

4.5 Vorversuchsprotokoll Wasserrad mit Peltonschaufeln, ohne Getriebe mit Schutz vor äusseren Einflüssen

In diesem Versuch wird getestet, ob eine Abschirmung des Wasserrades vor Störeinflüssen einen Einfluss auf das Drehzahlverhalten des Wasserrades hat.

Versuchsaufbau

Bei diesem Versuch wird das selbe Wasserrad mit Peltonschaufeln verwendet, das bei dem Versuch zu den Störeinflüssen verwendet wurde. Einziger Unterschied ist, dass das Wasserrad von oben mit einer Platte vor äusseren Störeinflüssen durch Wasser geschützt ist. Der Wasserdruck beträgt 1 bar und der Volumenstrom ergibt sich zu 2.2 l/min. Die Wasserdüse besitzt eine Öffnungsdurchmesser von 2 mm und wird so nah wie möglich beim Wasserrad montiert um die Störeinflüsse so gering wie möglich zu halten. Die Störeinflüsse werden mit Wasser aus einer Giesskanne simuliert. Dabei wird das Wasser von oben auf den Wascharm gespritzt.

Versuchsdurchführung

Das Wasserrad wird durch den Wasserstrahl aus der Düse beschleunigt. Wenn dieser auf der maximalen Drehzahl ist, wird das Störwasser von oben mit der Giesskanne auf den Wascharm geleert. Dabei wird das Verhalten der Wascharmdrehzahl beobachtet.

Ergebnisse

Die Drehzahl des Wascharmes fällt beim Start der Störung stark ab und dreht noch ganz langsam. Der Wascharm bleibt jedoch nicht stehen.

Schlussfolgerung

Das Abschirmen des Wasserrades vor dem Störwasser bringt den gewünschten Effekt, dass die Störung von aussen einen geringeren Einfluss auf die Drehbewegung des Wascharmes hat. Aus diesem Grund wird eine Abschirmung bei der Konstruktion mit einbezogen.

4.6 Vorversuchsprotokoll Wasserrad mit Gehäuse

Bei diesem Versuch wird getestet, wie gut der Antrieb des Wascharmes mit einem Wasserrad, das in einem Gehäuse untergebracht ist, funktioniert. Für diesen Versuch werden zwei unterschiedliche Wasserräder verwendet.

Versuchsaufbau

Das Wasserrad und das dazugehörige Gehäuse bestehen aus 3D gedrucktem Kunststoff. Das Gehäuse ist fest mit dem Wasserrohr des Wascharmes verbunden. Das Wasserrad ist mit dem Wascharm verbunden und treib diesen an. Ein Wasseranschluss für den Antrieb ist mit einer GEKA-Kupplung versehen, an dem ein Wasserschlauch für die Zufuhr der Antriebsenergie befestigt ist. Die Teile verfügen über keinerlei Dichtungen. Aus diesem Grund fliesst bei kleinen Spaltöffnungen Wasser heraus. Die Spaltöffnungen werden benötigt, damit die drehbaren Teile eine möglichst geringe Reibung aufweisen.

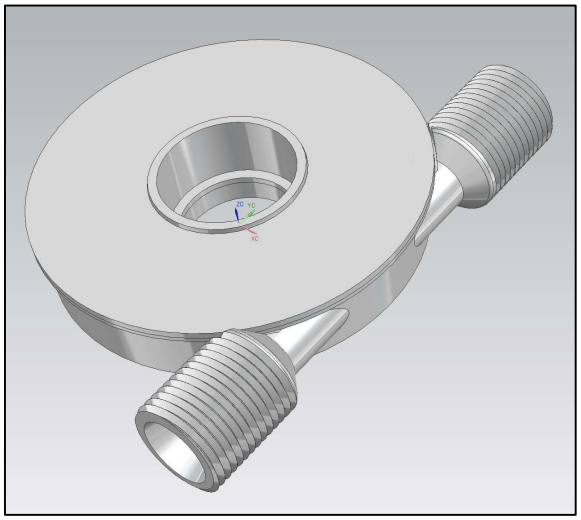


Abbildung 29: 3D-Modell vom Wasserrad mit Gehäuse

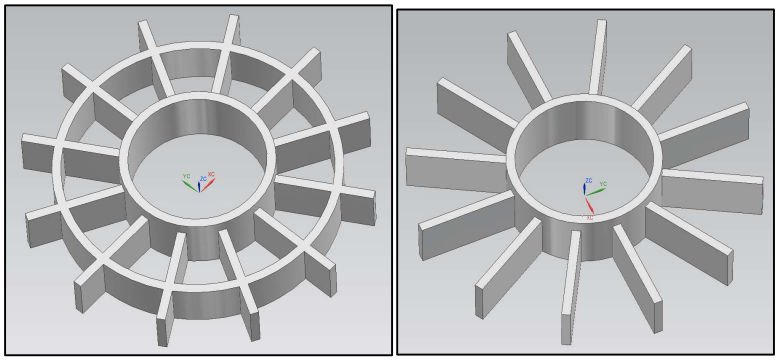


Abbildung 30: Wasserräder mit unterschiedlichen Flügeln

Abbildung 31: Versuchsaufbau Wasserrad mit Gehäuse

Versuchsdurchführung

Durch Öffnen des Wasserhahns, an dem der Gartenschlauch (gelb) angeschlossen ist, kann der Volumenstrom des Wassers eingestellt werden. Wenn der Volumenstrom für den Antrieb des Wascharmes genügend gross ist, fängt dieser an zu drehen. Dieser Versuch wird mit beiden Wasserrädern durchgeführt, um herauszufinden welche Geometrie für diese Antriebsform besser geeignet ist.

Ergebnisse

Der Antrieb mit dem Wasserrad links funktioniert besser mit dem rechts abgebildeten. Die Montage der Kunststoffteile ist aufgrund der kleinen Spalten zwischen den beweglichen Teilen sehr heikel. Bereits kleine Verformungen des Gehäuses durch das Gewicht des Gartenschlauches reicht, damit das Wasserrad im Gehäuse blockiert. Daher ist eine genaue Ausrichtung und Montage der Bauteile sehr wichtig.

Schlussfolgerung

Das links abgebildete Wasserrad funktioniert für den Antrieb des Wascharmes. Das rechts abgebildete Wasserrad funktioniert nicht zufriedenstellend. Die Montage der Kunststoffteile stellt eine grosse Herausforderung dar. Es muss ein optimaler Kompromiss zwischen einem kleinstmöglichen Spalt zwischen den beweglichen Teilen aufgrund von Lekageverlusten und einer freien Beweglichkeit dieser Teile gefunden werden. Für das Gehäuse sind eine steife Konstruktion und steife Materialien wichtig.

4.7 Vorversuchsprotokoll Wasserrad mit Gehäuse ohne Übersetzung Störeinflüsse

Bei diesem Versuch wird der Einfluss von äusseren Störungen auf den Antrieb des Wascharmes mit einem Wasserrad in einem Gehäuse ohne Übersetzung beobachtet.

Versuchsaufbau

Der Aufbau dieses Versuches ist identisch mit dem des Vorversuches zur Beobachtung des dynamischen Verhaltens durch den Antrieb mit einem Wasserrad mit Gehäuse und ohne Übersetzung. Störeinflüsse auf den Reinigungsarm werden in Form von Wasser aus einer Giesskanne simuliert. Beim Wirken dieser Störeinflüsse wird das Drehzahlverhalten des Wascharmes beobachtet.

Versuchsdurchführung

Für den Antrieb des Wasserrad wird ein maximaler Volumenstrom von 11.3 l/min bei einem Druck von 0.4 bar gemessen. Dies entspricht dem maximalen Durchfluss durch den Wasserschlauch der Wasserversorgung.

Ergebnisse

Das Wasserrad kann durch den oben genannten Volumenstrom nicht selbstständig in Bewegung gesetzt werden. Die Reibungskräfte zwischen den beweglichen Teilen ist zu gross. Somit kann keine Aussage zum Störverhalten gemacht werden.

Schlussfolgerung

Der Wascharm kann nicht einmal ohne äussere Störungen in Bewegung gesetzt werden. Die Antriebseinheit hat zu viel interne Reibungsverluste. Dies liegt an einer eher ungünstigen Konstruktion des Gehäuses und an der Gleitlagerung, die viel Lagerluft für einen zuverlässigen Betrieb benötigt. Durch diese Lagerluft hat das Wasserrad zu viel Bewegungsfreiraum und streift daher das Gehäuse.

4.8 Vorversuchsprotokoll Wasserrad mit Getriebeübersetzung 1:4

Mit diesem Versuch wird getestet, ob der Antrieb des Wascharmes mit einer Getriebeübersetzung funktioniert. Zudem wird das dynamische Verhalten dieses Systems beobachtet.

Versuchsaufbau

Das Getriebe besteht aus zwei Zahnrädern. Diese erreichen eine Übersetzung von 1:4. Die Verzahnung ist abgerundet, um möglichst keine Ecken für die Ablagerung von Schmutz zu bieten. Diese Art der Verzahnung ermöglicht es, den Kraftfluss in der gleichen Ebene oder um 90 Grad abgewinkelt zu übertragen. Bei diesem Versuch wird die Getriebekonstellation für die Kraftübertragung in der gleichen Ebene verwendet.

Der Antrieb des kleinen Ritzels geschieht durch ein Wasserrad mit einem Aussendurchmesser von 60 mm und 8 Flügeln. Das Wasser spritzt mit einem Strahldurchmesser von ca. 2 mm auf die Flügel des Wasserrades.

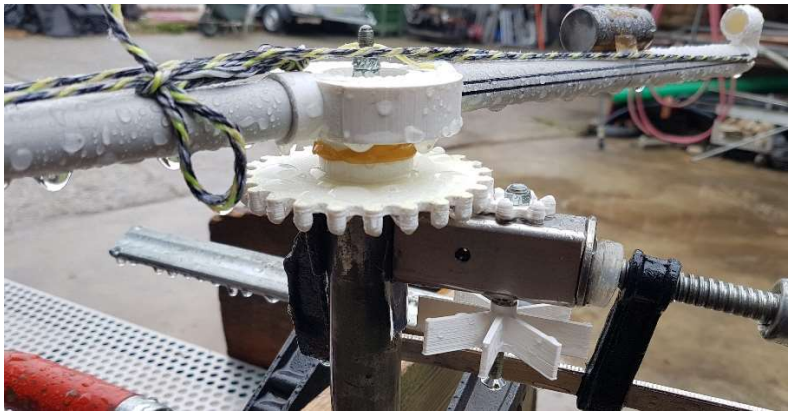


Abbildung 32: Versuchsaufbau Wasserrad mit Getriebeübersetzung

Versuchsdurchführung

Das Wasser für den Antrieb des Wasserrades fliesst durch eine 2 mm Düse. Dadurch wird dieses stark beschleunigt und trifft auf die Wasserradschaufeln. Dieses beginnt sich zu drehen und treibt den Wascharm mit einer 4-mal höheren Drehzahl an. Durch diese Drehzahlabsenkung des Wascharmes wird ein grösseres Moment erzeugt. Durch ändern des Anströmwinkels des Wasserstrahles kann die Drehzahl und die Drehrichtung des Wascharmes beeinflusst werden. Die Drehzahl kann allerding auch über den Volumenstrom des Wasserstrahles gesteuert werden.

Ergebnisse

Der Antrieb funktioniert sehr gut. Durch das höhere Drehmoment aufgrund der Übersetzung wird der Wascharm schnell auf die Betriebsdrehzahl beschleunigt. Der Drehrichtungswechsel funktioniert ebenfalls gut.

Schlussfolgerung

Durch den Antrieb des Wascharmes mit einem Wasserrad, das über eine Übersetzung verfügt, kann der Volumenstrom gegenüber dem Wasserrad ohne Übersetzung reduziert werden. Das Wasser des Antriebes spritzt beim Auftreffen auf die Schaufeln des Wasserrades in alle Richtungen. Dieses Wasser unterstützt die Reinigung der Waschgüter. Die Beschleunigungs- und Abbremszeit des Wascharmes liegen nach Schätzungen unter 10 Sekunden.

4.9 Vorversuchsprotokoll Wasserrad mit Getriebeübersetzung 1:8

Bei diesem Versuch wird der Antrieb mit einem Wasserrad und einer Getriebeübersetzung von 1:8 getestet.

Versuchsaufbau

Bei diesem Versuch wird das selbe Wasserrad, wie beim bereits durchgeführten Versuch mit Getriebe mit einem Aussendurchmesser von 60 mm verwendet. Die Getriebeübersetzung wird jedoch von 1:4 auf 1:8 verdoppelt. Dadurch sollte das Antriebsmoment auch verdoppelt werden. Das Wasser für den Antrieb strömt aus einer 2 mm Düse. Es wird eine äussere Störung auf den Wascharm mit Wasser aus einer Giesskanne gegeben. Zudem wird das Antriebsmoment mit einer Zugwaage am Wascharm gemessen. Der Messpunkt liegt 0.27 m vom Drehpunkt entfernt.

Abbildung 33: Wasserrad mit Getriebeübersetzung 1:8

Versuchsdurchführung

Der Wasserdruck wird zuerst auf 0.8 bar eingestellt. Dadurch ergibt sich ein Volumenstrom von 1.96 l/min. Nach der Beschleunigungsphase wird das Störwasser mit der Giesskanne auf den Wascharm geleert. Nach dieser Beobachtung wird das Antriebskraft am Wascharm mit einer Zugwaage gemessen.

Die Waage hat einen Messbereich zwischen 0 und 2 Newton. Anschliessend wir der Wasserdruck auf 1.7 bar gestellt und erneut die Antriebskraft mit der Zugwaage gemessen.

Ergebnisse

Die Drehzahl des Wascharmes fällt beim Start des Störwassers auf einen kleineren Wert. Gefühlsmässig ist die Drehzahl jedoch noch grösser als die minimal geforderten 25 U/min.

Die Zugwaage für die Messung der Antriebskraft zeigt eine Kraft von ungefähr 0.25 N bei einem Wasserdruck von 0.8 bar an. Dies ergibt mit dem Hebelarm aus dem Messpunkt ein Moment von 0.0675 Nm.

Beim Wasserdruck von 1.7 bar ist eine Kraft von ca. 0.6 N messbar. Aus dem Hebelarm des Messpunktes von 0.27 m ergibt sich daraus ein Antriebsmoment von 0.162 Nm.

Schlussfolgerung

Die doppelte Übersetzung von 1:8 gegenüber des Versuches mit dem Wasserrad mit Getriebe und einer Übersetzung von 1:4 ist beim Störverhalten deutlich spürbar. Dies bedeutet, dass eine grössere Übersetzung deutlich bessere Werte für die Drehzahlstabilität bringt.

4.10 Vorversuchsprotokoll Wasserrad ohne Gehäuse mit Übersetzung Störverhalten

Bei diesem Versuch wird das Störverhalten des Antriebes mit einem freiliegenden Wasserrad mit Getriebeübersetzung beobachtet.

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist gleich wie bei dem Vorversuch zur Beobachtung des dynamischen Verhaltens eines Wasserrades ohne Gehäuse und mit Übersetzung. Das Wasser spritzt aus einer 2 mm Düse auf das Wasserrad. Dieses hat einen Aussendurchmesser von 60 mm. Die Übersetzung beträgt 1:4. Dies bedeutet, dass das Wasserrad vier Mal schneller dreht, als der Wascharm. Dadurch wird das Antriebsmoment des Wasserrades um das Vierfache erhöht. Der relative Wasserdruck in der Düse beträgt bei diesem Versuch 1.12 bar. Daraus ergibt sich ein gemessener Volumenstrom des Wassers von 1.50 L/min. Die Störeinflüsse werden mit Wasser aus einer Giesskanne simuliert. Dabei wird das Wasser von oben auf den Wascharm gespritzt und das Verhalten der Drehzahl des Wascharmes beobachtet.

Versuchsdurchführung

Der Wascharm wird durch den Wasserstrahl, der auf das Wasserrad trifft, angetrieben. Die Drehzahl liegt zwischen gemessenen 50 und 60 U/min. Sobald der Wascharm nicht mehr weiter beschleunigt, wird Wasser aus der Giesskanne auf den Wascharm geleert und damit eine Störung simuliert. Dabei wird das Verhalten der Drehzahl des Waschармes beobachtet.

Ergebnisse

Die Drehzahl fällt beim Auftreffen des Wassers aus der Giesskanne langsam ab. Nach dem Abfall auf einen tieferen Wert bleibt sie jedoch konstant. Nach dem Beenden der Störung durch das Wasser aus der Giesskanne beschleunigt der Wascharm wieder auf die Ausgangsdrehzahl.

Schlussfolgerung

Die Drehmomenterhöhung durch das Getriebe macht sich bei dem Störverhalten spürbar. Störeinflüsse auf die Drehzahl des Waschармes sind zu beobachten. Die Drehzahl fällt jedoch nicht auf 0 ab wie bei dem Wasserrad ohne Übersetzung.

4.11 Versuchsprotokoll Volumenstrommessung

Bei diesem Versuch werden zwei Düsen mit einem Öffnungsdurchmesser von 2 mm und 3 mm mit unterschiedlichen Wasserdrücken beaufschlagt. Der sich dabei einstellende Volumenstrom durch die Düsen wird gemessen.

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus einem Wasserschlauch, der als Wasserversorgung dient. Dieser Wasserschlauch ist an einem Hahn montiert, mit dem der Durchfluss eingestellt werden kann. Nach dem Hahn ist ein Volumenstrommessgerät des Typs MIM-1205HG4C3T0 vom Hersteller Kobold verwendet. Dieses besitzt einen Messbereich zwischen 0.04 und 10 l/min. Nach dem Volumenstrommessgerät wird ein Manometer mit einem Druckbereich zwischen 0 und 4 bar und einer Auflösung von 0.02 bar eingebaut. Am Ausgangsanschluss des Manometers wird ein kurzes Schlauchstück montiert, an dem die getesteten Wasserdüsen montiert sind. Die getesteten Wasserdüsen wurden mit dem 3D-Drucker aus Kunststoff hergestellt und mit einem entsprechenden Bohrer nachbearbeitet, damit der Öffnungsdurchmesser stimmt. Die Düsen sind nicht strömungsoptimiert. Sie werden lediglich dazu verwendet um eine Tendenz des Volumenstromes aufzuzeigen und eine einfache Berechnungsgrundlage zu schaffen.

Abbildung 34: Versuchsaufbau Volumenstrommessung

Versuchsdurchführung

Es werden verschiedene Wasserdrücke zwischen 0 und 2 bar in 0.1 bar Abständen eingestellt. Der sich dabei einstellende Volumenstrom des Wassers durch die 2 mm und 3 mm Düsen wird dabei am Volumenstrommessgerät abgelesen und notiert.

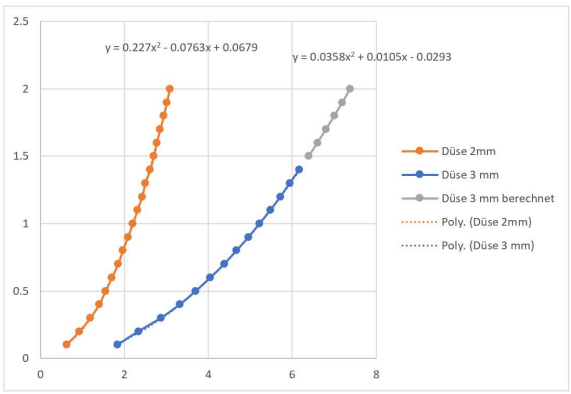
Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Tabellen und der Grafik zu sehen. Bei der 3 mm Düse musste die Messung bei einem Wasserdruck von 1.5 bar abgebrochen werden. Dies aufgrund von auftretenden Verwirbelungen und vermutlich turbulenten Strömungen in der Düse. Diese sorgten dafür, dass der Volumenstrom ab ungefähr 1.45 bar schlagartig um etwa 1 l/min zurück ging und somit das Messergebnis verfälscht wurde. Aus diesem Grund sind die Volumenstromwerte ab 1.4 bar aus der Trendlinie berechnet. Die berechneten Werte sind in der Grafik grau eingefärbt.. Das Auftreten dieser Verwirbelungen und sehr hohen Verluste ist der nicht strömungsoptimierten Düsengeometrie der Versuchsdüse verschuldet.

Tabelle 7: Ergebnisse Volumenstrommessung

Düse 2mm	
Druck [bar]	Volumenstrom [l/min]
0.1	0.62
0.2	0.93
0.3	1.19
0.4	1.4
0.5	1.55
0.6	1.7
0.7	1.85
0.8	1.96
0.9	2.08
1	2.2
1.1	2.31
1.2	2.42
1.3	2.5
1.4	2.61
1.5	2.7
1.6	2.77
1.7	2.85
1.8	2.94
1.9	3.01
2	3.08

Düse 3mm	
Druck [bar]	Volumenstrom [l/min]
0.1	1.83
0.2	2.33
0.3	2.87
0.4	3.32
0.5	3.7
0.6	4.05
0.7	4.38
0.8	4.67
0.9	4.96
1	5.22
1.1	5.48
1.2	5.72
1.3	5.94
1.4	6.17
1.5	6.39
1.6	6.60
1.7	6.81
1.8	7.00
1.9	7.20
2	7.38



Schlussfolgerung

Die Tendenz der Volumenströme durch die 2 mm und 3 mm Düse sind klar zu erkennen. Durch die 3 mm Düse fliesst teilweise fast der dreifache Volumenstrom. Dies hat einen enormen Einfluss auf den Wasserverbrauch und die Antriebsleistung. Diese Werte werden als Referenzwerte für eine Vorauslegung des Antriebes durch ein Wasserrad verwendet.

4.12 Vorversuchsprotokoll Schrittmotor

Beim folgenden Versuch wird das dynamische Verhalten des Wascharmes mit dem Antrieb durch einen Schrittmotor beobachtet.

Versuchsaufbau

Der Schrittmotor verfügt über vier Anschlüsse (A1, A2, B1, B2), von denen jeweils zwei (A1, A2 und B1, B2)miteinander über eine Magnetspule verbunden sind. Für den Betrieb eines Schrittmotors ist ein Schrittmotortreiber notwendig. Dieser bekommt Schaltsignale von einem Microcontroller und verstärkt diese für den Betrieb des Motors. Die Energie für den Betrieb des Schrittmotors kommt von einer 12V Stromquelle, die den Schrittmotortreiber speist. Als Microcontroller wird ein Arduino UNO Board verwendet. Das Programm ist so geschrieben, dass der Motor abwechslungsweise die Drehrichtung wechselt. Die Verbindung zwischen dem Motor und dem Wascharm wird über einen Gummiband-Riementrieb hergestellt. Als Schrittmotor wird ein Hybridschrittmotor des Typs 42BTGHW811 verwendet. Dieser hat ein Rastmoment von 27.5 mNm. Für die Beschleunigung wird jedoch ein Drehmoment von 1.01 mNm benötigt.

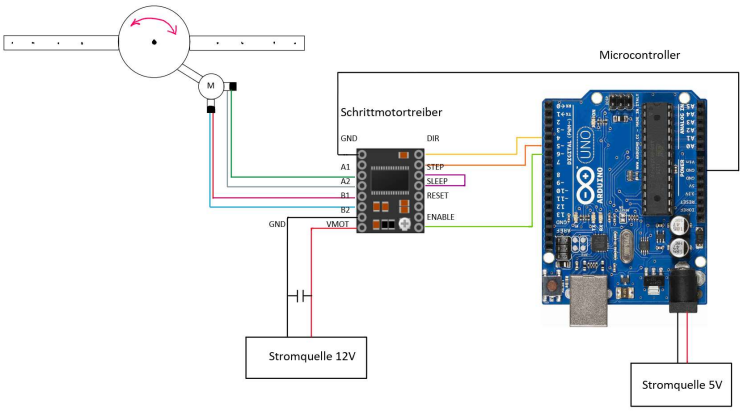


Abbildung 35: Schematischer Anschlussplan Schrittmotor

```
Schrittmotor1
int Index;

void setup()
{
pinMode(6, OUTPUT); //Enable
pinMode(5, OUTPUT); //STEP
pinMode(4, OUTPUT); //Direction

digitalWrite(6,LOW);//Enable
}

void loop()
{
digitalWrite(4,HIGH);//DIR

for(Index = 0; Index < 10000; Index++)
{
digitalWrite(5,HIGH); //STEP
delayMicroseconds(750);
digitalWrite(5,LOW); //STEP
delayMicroseconds(750);
}
delay(1000);

digitalWrite(4,LOW); //DIR

for(Index = 0; Index < 10000; Index++)
{
digitalWrite(5,HIGH);
delayMicroseconds(750);
digitalWrite(5,LOW);
delayMicroseconds(750);
}
delay(1000);
}
```

Abbildung 36: Arduino Programm

Abbildung 37: Versuchsaufbau Schrittmotor

Versuchsdurchführung

Der Schrittmotor treibt den Wascharm abwechselnd in beide Drehrichtungen an. Somit kann das dynamische Verhalten des Antriebssystems beobachtet werden. Durch das Gummiband, welches als Riementrieb verwendet wird, werden Drehmomentspitzen zuverlässig gedämpft.

Ergebnisse

Es ist zu beobachten, dass der Reinigungsarm die Solldrehzahl sehr schnell erreicht. Durch das elastische Verhalten des Gummibandes ist festzustellen, dass durch den überdimensionierten Schrittmotor grosse Drehmomentspitzen beim Beschleunigen und Abbremsen des Waschармes auftreten.

Schlussfolgerung

Durch die Massenträgheit des Waschармes entstehen bei einem schlagartigen Beschleunigen und Abbremsen hohe Drehmomente. Dies schliesst darauf, dass bei der Verwendung eines Schrittmotors

ein Sanft-Anlauf und Sanft-Abbremsen nötig ist, um Drehmomentspitzen und Schrittverluste zu verhindern.

4.13 Vorversuchsprotokoll Störeinflüsse Schrittmotor

Bei diesem Versuch wird das Drehzahlverhalten des Wascharmes beim Einfluss von äusseren Störungen in Form eines Bremsmomentes beobachtet. Der Antrieb geschieht mit dem Schrittmotor hat die Bezeichnung 42BTGHW811 und ist der selbe aus dem Vorversuch zum dynamischen Verhalten beim Antrieb mit einem Schrittmotor.

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist identisch mit dem aus dem Vorversuch zur Beobachtung des dynamischen Verhaltens beim Antrieb mit einem Schrittmotor. Die Kraftübertragung zwischen dem Elektromotor und dem Wascharm geschieht ebenfalls mit einem Gummiband, das als Riementrieb funktioniert. Das Bremsmoment wird von Hand auf das zentrale Drehstück des Wascharmes gegeben. Dieses kann betragsmässig nur schwer abgeschätzt werden. Bei diesem Versuch geht es hauptsächlich darum, ein Gefühl für das Drehzahlverhalten des Antriebssystems bei Störeinflüssen zu bekommen.

Versuchsdurchführung

Der Schrittmotor wird durch Programmieren des Arduino-Boards auf eine entsprechende Drehzahl gebracht, die den Wascharm auf rund 27 U/min bringt (wurde berechnet und mit einem Drehzahlmessgerät gemessen). Das Bremsmoment wird von Hand auf das Drehteil des Wascharmes gebracht und beobachtet, welchen Einfluss dieses auf die Drehzahl des Wascharmes hat.

Ergebnisse

Der Wascharm erfährt keine Drehzahländerung durch das Bremsmoment. Die einzige kurzfristige Drehzahländerung erfährt der Wascharm aufgrund des elastischen Gummiband-Riementriebes.

Schlussfolgerung

Der beim Versuch verwendete Schrittmotor verfügt über genügend Antriebsmoment, um dem Bremsmoment entgegenzuhalten. Ausserdem sollte der Schrittmotor über genügend Drehmoment verfügen, da bei Schlupf Schrittverluste entstehen. Diese sind bei Anwendungen mit Schrittmotoren nicht erwünscht.

5 Datenblätter

Nachfolgend sind Datenblätter zu Geräten, Materialien oder sonstigen Bauteilen zu finden, auf die in der Hauptdokumentation verwiesen wird.

5.1 Schrittmotor

Hybrid Stepper Motor

42BYGHW Series

General Specifications

Step Accuracy	± 5%
Temperature Rise	80°C Max
Ambient Temperature Range	-20°C ~ +50°C
Insulation Resistance	100 MΩ Min. 500 VDC
Dielectric Strength	500 VAC 1 minute

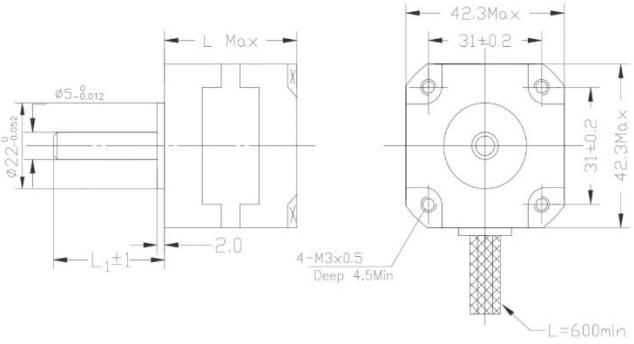
Customized solutions on request.

Hetai Motor

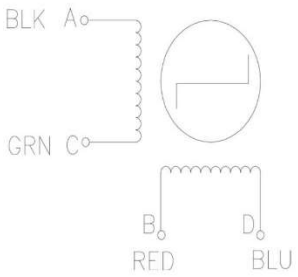
Electrical Specifications

Model	Step Angle	Motor Length	Rate Voltage	Rate Current	Phase Resistance	Phase Inductance	Holding Torque	Detent Torque	Rotor Inertia	Lead Wire	Motor Weight
	°	L (mm)	V	A	Ω	mH	mNm	mNm	gcm²	NO.	kg
42BYGHW205-03	1.8	34	11	0.3	36.6	22	200	19.6	34	6	0.2
42BYGHW208-04	1.8	34	12	0.4	30	37	310	19.6	34	4	0.2
42BYGHW213-06-01	1.8	34	11.7	0.6	19.5	13.5	280	19.6	34	5	0.2
42BYGHW602-02	1.8	40	11.76	0.4	29.4	21.8	290	21.6	54	6	0.24
42BYGHW607-01	1.8	40	3.7	1.2	3.11	2.9	310	21.6	54	6	0.24
42BYGHW609	1.8	40	3.4	1.7	2	3	400	21.6	54	4	0.24
42BYGHW801-05	1.8	48	12	0.4	31	25.4	400	27.5	68	6	0.34
42BYGHW804	1.8	48	3.6	1.2	3	5	480	27.5	68	4	0.34
42BTGHW811	1.8	48	3.12	2.5	1.25	1.8	500	27.5	68	4	0.34

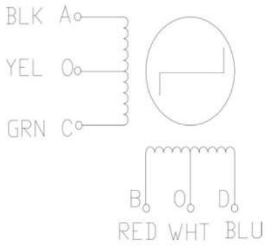
Mechanical Dimensions



Wiring Diagram



4 Leads



6 Leads

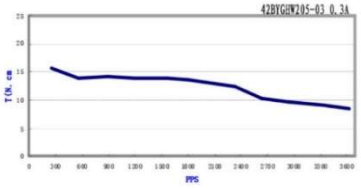
Datasheet-42BYGHW Series-15A-JB

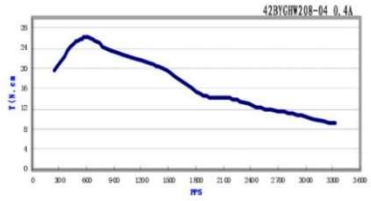
promoco
www.promoco-motors.com
info@promoco-motors.com

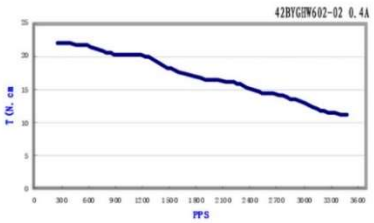
The specifications are believed to be accurate and reliable. However, the suitability has to be determined for a specific application. Specifications are subject to change without notice.

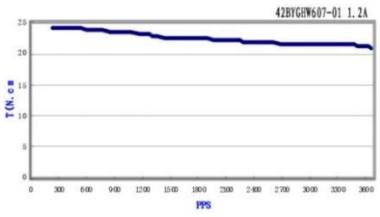
Hybrid Stepper Motor

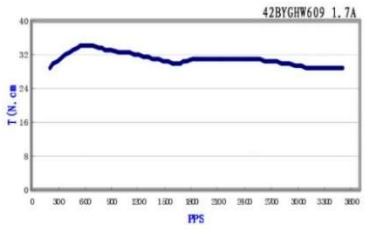
Pulse-Torque Characteristics

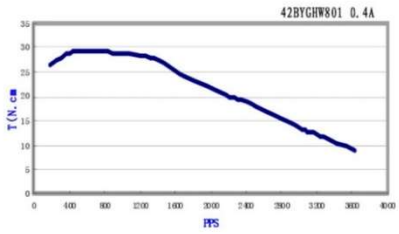


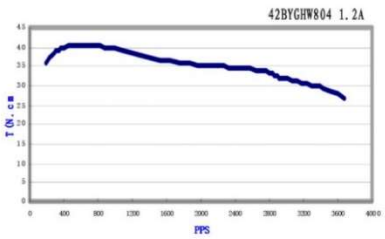


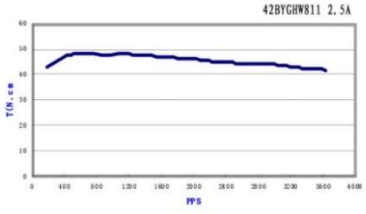












Datasheet-42BYGHW Series-15A-JB

promoco
www.promoco-motors.com
info@promoco-motors.com

The specifications are believed to be accurate and reliable. However, the suitability has to be determined for a specific application. Specifications are subject to change without notice.

(promoco, 2021)

5.2 Schrittmotorentreiber

STEPSTICK DRV8825 v1.0 DATASHEET

Author	Bart Meijer
Date	21st of October 2013
Document version	1.0

ReprapWorld.com

PRODUCT OVERVIEW

The stepstick DRV8825 is a breakout board for the Texas Instruments DRV8825 stepper motor controller. You can use this board to act as interface between your microcontroller and stepper motor. The DRV8825 is able to deliver up to 2.5A and can be controlled with a simple step/direction interface. The controller has a resolution of min. 1/32 step and protective features for over-current, short circuit and over-temperature. See the DRV8825 Datasheet for details on the DRV8825 controller.

The stepstick DRV8825 supersedes the stepstick A4988, which has been discontinued. The aim is for the stepstick DRV8825 to be a drop-in replacement for Stepstick A4988.

SAFETY WARNINGS

Always disconnect the power source from the board before unplugging the stepper motor and/or adjusting the current. Failure to do so may result in permanent damage to the board and/or injuries due to high voltage spikes.

The stepper driver may get **HOT**, do not touch the device until it had a few minutes to cool down after operation.

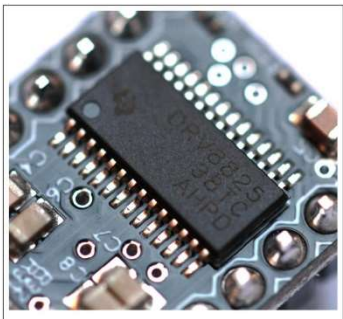
It is recommended to drive the stepper motor on current as low as possible to reduce power consumption and increase lifespan.

It is **NOT** recommended to turn the stepper motor while connected to the electronics. While turning the stepper motor, large voltages may be emitted through the VMOT pin, which can damage the electronics.

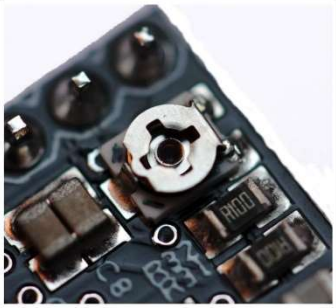
TECHNICAL SPECIFICATION

Controller	DRV8825
Operating Voltage (logic)	3-5.25V
Operating Voltage (vmot)	12-24V
Max current	2.5A
Dimensions	20.4x15.6mm

MAJOR FEATURES



DRV8825
Powerful DRV8825 with
- High current driver capable up to 2.5A
- Six different step resolutions: full-step, half-step, 1/4-step, 1/8-step, 1/16-step, and 1/32-step
- Protection against over-temperature and over-current
- No logic voltage required



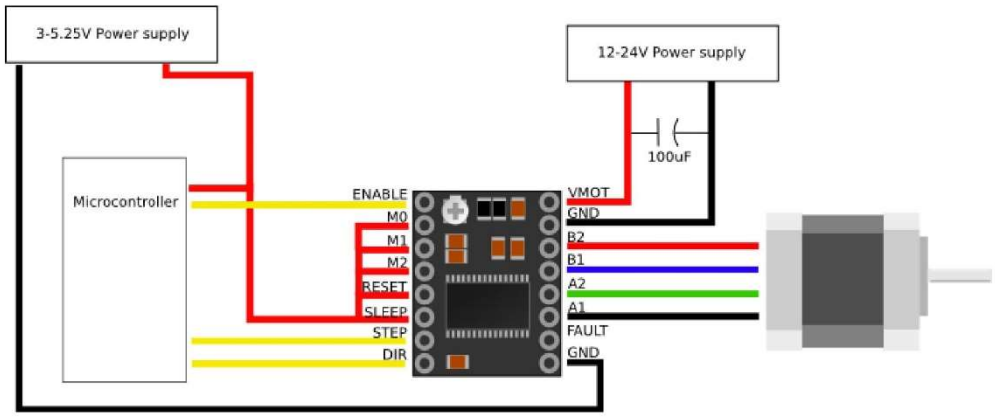
Adjustable current
Using the trimpot on the board you can easily turn the current up or down. Turn left to lower the current, right to output a higher current.

OTHER FEATURES

- Four layer high quality PCB board
- Pre-soldered, no need to solder the headers

EXAMPLE CIRCUIT

The following diagram lists the pins and show an example circuit.



Name	Description
Enable	Enable/disable the stepper driver HIGH – Disable LOW – Enable *
M0 – M2	Step resolution setting, see chapter 'step resolution configuration'
RESET	Enable/disable the H-bridge output * LOW – Disable * HIGH – Enable
SLEEP	Enable/disable low-power sleep mode LOW – Sleep * HIGH – Active
STEP	LOW → HIGH, move one step
DIR	LOW / HIGH switches direction
VMOT	Motor power (12-24V)
GND	System ground
FAULT	LOW when the stepper driver is in fault condition. You can provide 5V on this pin for compatibility with stepstick A4988

* this is the default state when the pin is not connected

STEP RESOLUTION CONFIGURATION

The DRV8825 had six step resolution modes, which can be configured using the M0-M2 pins on the stepstick DRV8825. The following table lists the step resolution settings:

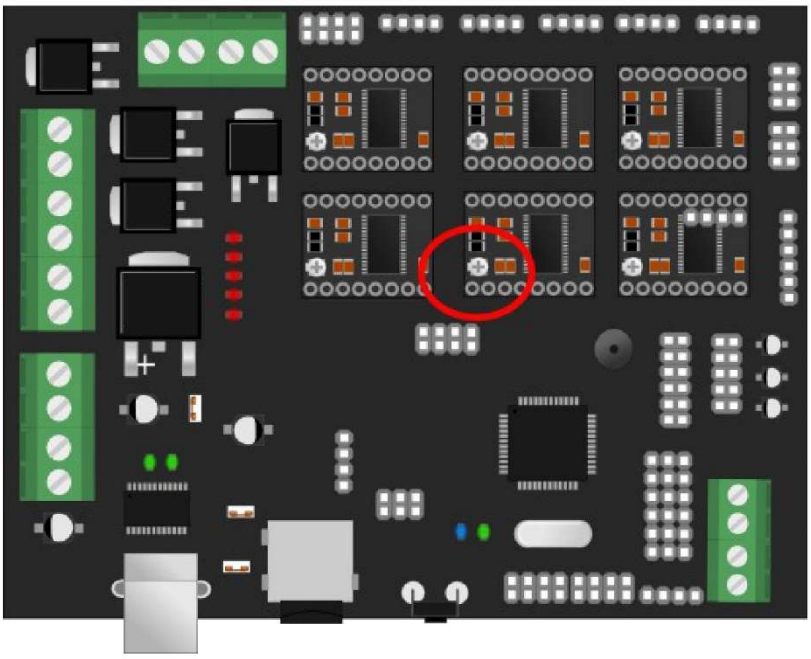
M0	M1	M2	Resolution
Low	Low	Low	Full step
High	Low	Low	Half step
Low	High	Low	1/4 step
High	High	Low	1/8 step
Low	Low	High	1/16 step
High	Low	High	1/32 step
Low	High	High	1/32 step
High	High	High	1/32 step

COMPATIBILITY WITH REPRAP HARDWARE

The stepstick DRV8825 should be compatible with most RepRap hardware available. The following images show how to insert the stepstick DRV8825 in the most populair RepRap hardware.

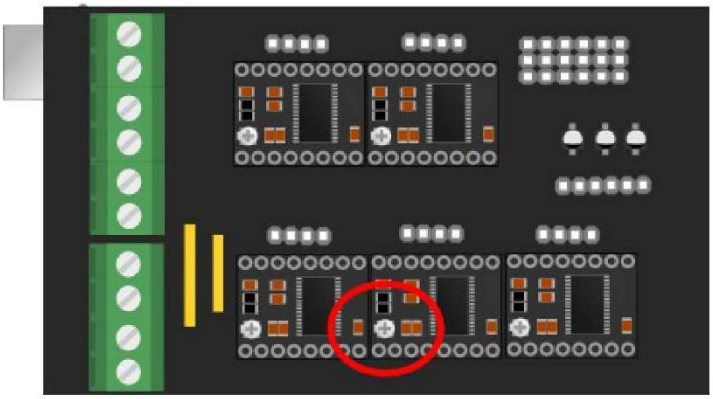
Megatronics

The orientation of the stepstick is indicated with the trimpot, marked with a red circle.



RAMPS

The orientation of the stepstick is indicated with the trimpot, marked with a red circle.



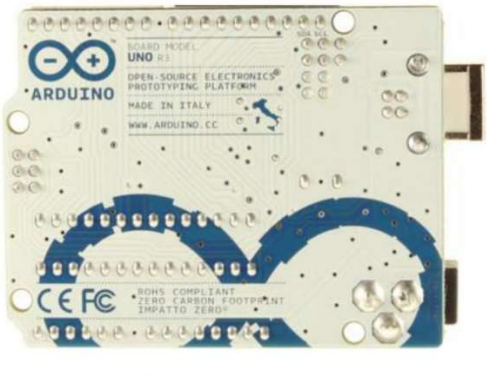
TROUBLESHOOTING	
The stepper motor does old torque (you can rotate the stepper motor by hand)	- Check if the power is enabled - Is the ENABLE pin LOW? - Are SLEEP and RESET put HIGH?
The motor is losing steps while turning	- When the chip overheats the thermal protection will disable the device. Turn down the trimpot. - You may have not enough torque, turn the trimpot to the right to increase current.

(ReprapWorld, 2021)

5.3 Arduino UNO

Arduino Uno

Arduino Uno R3 Front

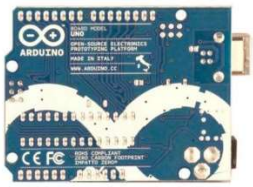


Arduino Uno R3 Back

Arduino Uno R2 Front

Arduino Uno SMD

Arduino Uno Front



Arduino Uno Back

Overview

The Arduino Uno is a microcontroller board based on the ATmega328 (datasheet). It has 14 digital input/output pins (of which 6 can be used as PWM outputs), 6 analog inputs, a 16 MHz ceramic resonator, a USB connection, a power jack, an ICSP header, and a reset button. It contains everything needed to support the microcontroller; simply connect it to a computer with a USB cable or power it with a AC-to-DC adapter or battery to get started.
The Uno differs from all preceding boards in that it does not use the FTDI USB-to-serial driver chip. Instead, it features the Atmega16U2 (Atmega8U2 up to version R2) programmed as a USB-to-serial converter.
Revision 2 of the Uno board has a resistor pulling the 8U2 HWB line to ground, making it easier to put into DFU mode.
Revision 3 of the board has the following new features:

- 1.0 pinout: added SDA and SCL pins that are near to the AREF pin and two other new pins placed near to the RESET pin, the IOREF that allow the shields to adapt to the voltage provided from the board. In future, shields will be compatible both with the board that use the AVR, which operate with 5V and with the Arduino Due that operate with 3.3V. The second one is a not connected pin, that is reserved for future purposes.
- Stronger RESET circuit.
- Atmega 16U2 replace the 8U2.

"Uno" means one in Italian and is named to mark the upcoming release of Arduino 1.0. The Uno and version 1.0 will be the reference versions of Arduino, moving forward. The Uno is the latest in a series of USB Arduino boards, and the reference model for the Arduino platform; for a comparison with previous versions, see the index of Arduino boards.

Summary

Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V

Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Clock Speed	16 MHz

Schematic & Reference Design

EAGLE files: arduino-uno-Rev3-reference-design.zip (NOTE: works with Eagle 6.0 and newer)
Schematic: arduino-uno-Rev3-schematic.pdf
Note: The Arduino reference design can use an Atmega8, 168, or 328, Current models use an ATmega328, but an Atmega8 is shown in the schematic for reference. The pin configuration is identical on all three processors.

Power

The Arduino Uno can be powered via the USB connection or with an external power supply. The power source is selected automatically.
External (non-USB) power can come either from an AC-to-DC adapter (wall-wart) or battery. The adapter can be connected by plugging a 2.1mm center-positive plug into the board's power jack. Leads from a battery can be inserted in the Gnd and Vin pin headers of the POWER connector.
The board can operate on an external supply of 6 to 20 volts. If supplied with less than 7V, however, the 5V pin may supply less than five volts and the board may be unstable. If using more than 12V, the voltage regulator may overheat and damage the board. The recommended range is 7 to 12 volts.
The power pins are as follows:

- **VIN.** The input voltage to the Arduino board when it's using an external power source (as opposed to 5 volts from the USB connection or other regulated power source). You can supply voltage through this pin, or, if supplying voltage via the power jack, access it through this pin.
- **5V.**This pin outputs a regulated 5V from the regulator on the board. The board can be supplied with power either from the DC power jack (7 - 12V), the USB connector (5V), or the VIN pin of the board (7-12V). Supplying voltage via the 5V or 3.3V pins bypasses the regulator, and can damage your board. We don't advise it.
- **3V3.** A 3.3 volt supply generated by the on-board regulator. Maximum current draw is 50 mA.
- **GND.** Ground pins.

Memory

The ATmega328 has 32 KB (with 0.5 KB used for the bootloader). It also has 2 KB of SRAM and 1 KB of EEPROM (which can be read and written with the EEPROM library).

Input and Output

Each of the 14 digital pins on the Uno can be used as an input or output, using pinMode(), digitalWrite(), and digitalRead() functions. They operate at 5 volts. Each pin can provide or receive a maximum of 40 mA and has an internal pull-up resistor (disconnected by default) of 20-50 kOhms. In addition, some pins have specialized functions:

- **Serial: 0 (RX) and 1 (TX).** Used to receive (RX) and transmit (TX) TTL serial data. These pins are connected to the corresponding pins of the ATmega8U2 USB-to-TTL Serial chip.
- **External Interrupts: 2 and 3.** These pins can be configured to trigger an interrupt on a low value, a rising or falling edge, or a change in value. See the attachInterrupt() function for details.
- **PWM: 3, 5, 6, 9, 10, and 11.** Provide 8-bit PWM output with the analogWrite() function.

- **SPI: 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK).** These pins support SPI communication using the SPI library.
- **LED: 13.** There is a built-in LED connected to digital pin 13. When the pin is HIGH value, the LED is on, when the pin is LOW, it's off.

The Uno has 6 analog inputs, labeled A0 through A5, each of which provide 10 bits of resolution (i.e. 1024 different values). By default they measure from ground to 5 volts, though is it possible to change the upper end of their range using the AREF pin and the analogReference() function. Additionally, some pins have specialized functionality:

- **TWI: A4 or SDA pin and A5 or SCL pin.** Support TWI communication using the Wire library.

There are a couple of other pins on the board:

- **AREF.** Reference voltage for the analog inputs. Used with analogReference().
- **Reset.** Bring this line LOW to reset the microcontroller. Typically used to add a reset button to shields which block the one on the board.

See also the mapping between Arduino pins and ATmega328 ports. The mapping for the Atmega8, 168, and 328 is identical.

Communication

The Arduino Uno has a number of facilities for communicating with a computer, another Arduino, or other microcontrollers. The ATmega328 provides UART TTL (5V) serial communication, which is available on digital pins 0 (RX) and 1 (TX). An ATmega16U2 on the board channels this serial communication over USB and appears as a virtual com port to software on the computer. The '16U2 firmware uses the standard USB COM drivers, and no external driver is needed. However, on Windows, a .inf file is required. The Arduino software includes a serial monitor which allows simple textual data to be sent to and from the Arduino board. The RX and TX LEDs on the board will flash when data is being transmitted via the USB-to-serial chip and USB connection to the computer (but not for serial communication on pins 0 and 1).
A SoftwareSerial library allows for serial communication on any of the Uno's digital pins.
The ATmega328 also supports I2C (TWI) and SPI communication. The Arduino software includes a Wire library to simplify use of the I2C bus; see the documentation for details. For SPI communication, use the SPI library.

Programming

The Arduino Uno can be programmed with the Arduino software (download). Select "Arduino Uno from the **Tools > Board** menu (according to the microcontroller on your board). For details, see the reference and tutorials.
The ATmega328 on the Arduino Uno comes preburned with a bootloader that allows you to upload new code to it without the use of an external hardware programmer. It communicates using the original STK500 protocol (reference, C header files).
You can also bypass the bootloader and program the microcontroller through the ICSP (In-Circuit Serial Programming) header; see these instructions for details.
The ATmega16U2 (or 8U2 in the rev1 and rev2 boards) firmware source code is available . The ATmega16U2/8U2 is loaded with a DFU bootloader, which can be activated by:

- On Rev1 boards: connecting the solder jumper on the back of the board (near the map of Italy) and then resetting the 8U2.
- On Rev2 or later boards: there is a resistor that pulling the 8U2/16U2 HWB line to ground, making it easier to put into DFU mode.

You can then use Atmel's FLIP software (Windows) or the DFU programmer (Mac OS X and Linux) to load a new firmware. Or you can use the ISP header with an external programmer (overwriting the DFU bootloader). See this user-contributed tutorial for more information.

Automatic (Software) Reset

Rather than requiring a physical press of the reset button before an upload, the Arduino Uno is designed in a way that allows it to be reset by software running on a connected computer. One of the hardware flow control lines (DTR) of the ATmega8U2/16U2 is connected to the reset line of the ATmega328 via a 100 nanofarad capacitor. When this line is asserted (taken low), the reset line drops long enough to reset the chip. The Arduino software uses this capability to allow you to upload code by simply pressing the upload button in the Arduino environment. This means that the bootloader can have a shorter timeout, as the lowering of DTR can be well-coordinated with the start of the upload. This setup has other implications. When the Uno is connected to either a computer running Mac OS X or Linux, it resets each time a connection is made to it from software (via USB). For the following half-second or so, the bootloader is running on the Uno. While it is programmed to ignore malformed data (i.e. anything besides an upload of new code), it will intercept the first few bytes of data sent to the board after a connection is opened. If a sketch running on the board receives one-time configuration or other data when it first starts, make sure that the software with which it communicates waits a second after opening the connection and before sending this data.
The Uno contains a trace that can be cut to disable the auto-reset. The pads on either side of the trace can be soldered together to re-enable it. It's labeled "RESET-EN". You may also be able to disable the auto-reset by connecting a 110 ohm resistor from 5V to the reset line; see this forum thread for details.

USB Overcurrent Protection

The Arduino Uno has a resettable polyfuse that protects your computer's USB ports from shorts and overcurrent. Although most computers provide their own internal protection, the fuse provides an extra layer of protection. If more than 500 mA is applied to the USB port, the fuse will automatically break the connection until the short or overload is removed.

Physical Characteristics

The maximum length and width of the Uno PCB are 2.7 and 2.1 inches respectively, with the USB connector and power jack extending beyond the former dimension. Four screw holes allow the board to be attached to a surface or case. Note that the distance between digital pins 7 and 8 is 160 mil (0.16"), not an even multiple of the 100 mil spacing of the other pins.

(Farnell, 2021)

5.4 Durchflussmessgerät

Magnetisch induktiver Strömungsmesser in Ganzmetallausführung Typ MIM

Beschreibung

Der neue Durchflussmesser des Typs MIM dient zur Messung und Überwachung kleinerer und mittlerer Durchflüsse von leitfähigen Flüssigkeiten in Rohrleitungen.

Das Gerät arbeitet nach dem magnetisch-induktiven Messprinzip. Gemäß dem Faradayschen Induktionsgesetz wird in einem Leiter, der sich in einem Magnetfeld bewegt, eine Spannung induziert. Das elektrisch leitfähige Messmedium entspricht in dem Prozess dem bewegten Leiter. Die durch das Messmedium induzierte Spannung ist proportional zur Durchflussgeschwindigkeit und somit ein Maß für den Volumendurchsatz. Voraussetzung ist eine minimale elektrische Leitfähigkeit des strömenden Mediums. Die induzierte Spannung wird über zwei Elektroden, die in leitendem Kontakt zum Medium stehen, einem Messverstärker zugeführt. Über den definierten Rohrleitungsdurchmesser wird der Volumenstrom errechnet.

Die Messung ist unabhängig vom Medium und dessen stofflichen Eigenschaften wie Dichte, Viskosität und Temperatur. Die Geräte verfügen über eine in 90° Schritten drehbare Digitalanzeige sowie 2 Ausgänge, die als Schalt-, Frequenz- oder Analogausgang konfiguriert werden können. Alternativ kann eine Dosierfunktion aktiviert werden. Hierbei ist Ausgang 1 = Schaltausgang und Ausgang 2 = Steuereingang.

Wesentliche Merkmale

- Edelstahldesign
- Durchfluss- und Temperaturmessung
- Überwachungs-, Dosier- und Transmitterfunktionen
- Dosierfunktion mit externem Steuereingang
- Farb-Multi-Parameter TFT-Display, Ausrichtung in 90° Schritten einstellbar
- Bidirektionale Messung
- Intuitives Einstellmenü über 4 optischen Tasten
- 2 individuell konfigurierbare Ausgänge (Puls-/Frequenz-/Alarm- und Analogausgang)
- Summen- und Teilmengenvolumenzähler

Technische Daten

Messverfahren:	magnetisch induktiv
Messbereiche:	siehe Tabelle Messbereiche
Messstoffe:	leitfähige Flüssigkeiten
Mindestleitfähigkeit:	≥20 µS/cm
Druckstufe:	16 bar
Messgenauigkeit:	<± (0,8 % vom MW + 0,5 % vom ME)*
Wiederholgenauigkeit:	±0,2 % vom ME
Ansprechzeit Strömung t_{90}	
(Alarm-/Puls-/Frequenzausgang):	<100 ms
(Analogausgang):	<1 s

Temperaturmessung

Sensor:	PT1000
Messgenauigkeit:	≤±2 °C (Strömung >0,2 m/s)
Messbereich:	Mediumstemperaturbereich
Ansprechzeit Temperatur t_{90} (Signalausgang):	<20 s

Einbaulage:	beliebig
Ein-/Auslaufstrecke:	3 x DN/2 x DN
Druckabfall:	siehe Druckverlust-Diagramm
Bedienung:	4 optische Tasten, mit Handschuh bedienbar**
Gehäuse:	Edelstahl 1.4404, Displayfenster PMMA

Medienberührte Teile

Anschlussfittings:	Edelstahl 1.4404
Isolierteil:	PEEK
Elektroden:	Edelstahl 1.4404
Dichtungen:	FKM (Option: EPDM)
Schutzart:	IP67

Temperaturbereiche

Bauform	Elektronik	Typ	Dichtungswerkstoff	Mediumstemperatur	Umgebungstemperatur
Kompaktversion	C3T	MIM-12 / MIM-13	FKM	-20 °C ... +70 °C	-20 °C ... +60 °C
			EPDM		
getrennte Ausführung (PVC-Kabel)	P02[1]	MIM-12 / MIM-13	FKM	-20 °C ... +85 °C	-20 °C ... +60 °C (Anzeigeelektronik)
			EPDM		-20 °C ... +85 °C (Sensor)
getrennte Ausführung (ETFE-Kabel)	E02[1]	MIM-12	FKM	-20 °C ... +140 °C	-20 °C ... +60 °C (Anzeigeelektronik)
					-20 °C ... +140 °C (Sensor)
		MIM-13	EPDM	-40 °C ... +140 °C	-20 °C ... +60 °C (Anzeigeelektronik)
					-40 °C ... +140 °C (Sensor)

[1] Kabellänge: 02 = 2 m, 05 = 5 m, 10 = 10 m, 15 = 15 m, 20 = 20 m

Elektrische Daten

Versorgungsspannung:	19 - 30 V_{DC}, Eigenstromaufnahme max. 200 mA
Anzeige:	TFT-Display, 128 x 128 Farbpixel, 1,4" Displayausrichtung in 90° Schritten einstellbar
Anzeigewiederholrate:	0,5 ... 10 s, einstellbar
Pulsausgang:	Push-Pull, frei skalierbar, konfigurierbar für Teil- und Gesamtvolumenzähler
Frequenzausgang:	Push-Pull, frei skalierbar 2 kHz @ Overflow f_{min} @ FS = 50 Hz f_{max} @ FS = 1000 Hz
Alarmausgang:	NPN, PNP, Push-Pull konfigurierbar max. 30 V_{DC}, max. 200 mA kurzschlussfest
Analogausgang:	aktiv, 3-Leiter, 0(4)-20 mA, max. Bürde 500 Ω oder 0(2)-10 V_{DC}, (R_i = 500 Ω)

*Unter Referenzbedingungen: Mediumstemperatur: 15 °C ... 30 °C, 1 cSt, 500 µS/cm, 1 bar Umgebungstemperatur: 15 °C ... 30 °C

** Eingeschränkte Bedienung mit schwarz gummierten Handschuhen

Magnetisch induktiver Strömungsmesser in Ganzmetallausführung Typ MIM

Technische Daten (Fortsetzung)

Steuereingang: aktives Signal U_{high} max. 30 V_{DC}
0 <Low <10 V_{DC}
15 V_{DC} <High <Vs

Dosierfunktion: Dosierausgang OUT2:
Push-Pull, High aktiv
Steuereingang OUT1:
START/STOP 0,5 s <t_{high} <4 s
RESET t_{high} >5 s

Elektrischer Anschluss: Stecker M12x1, 4-polig

Schockfestigkeit
DIN EN 60068-2-27:2010: 20 g (11 ms)

Vibrationsfestigkeit
DIN EN 60068-2-6:2008: 5 g (10 … 2000 Hz)

Klimaprüfung
DIN EN 60068-2-30:2006: Schärfegrad b

Messbereichstabelle

Anschluss	Innendurchmesser (DN)	Messbereich
G ¼	2,4 x 3 mm	0,01 ... 1 l/min
G ½	5 mm	0,03 ... 3 l/min / 0,04 ... 10 l/min
G ¾	10 mm	0,1 ... 25 l/min / 0,2 ... 50 l/min
G 1	15 mm	0,2 ... 50 l/min / 0,4 ... 100 l/min
G2 / 2" NPT	siehe Abmessungszeichnung	1,5 ... 350 l/min

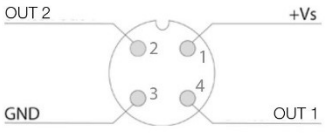
Konfiguration der Ausgänge

Ausgang 1 (OUT1, PIN 4)	Ausgang 2 (OUT2, PIN 2)
Analogausgang 4-20 mA	Analogausgang 4-20 mA
Analogausgang 0-20 mA	Analogausgang 0-20 mA
Analogausgang 2-10 V	Analogausgang 2-10 V
Analogausgang 0-10 V	Analogausgang 0-10 V
Schaltausgang NPN/PNP/PP	Schaltausgang NPN/PNP/PP
Pulsausgang PP	Pulsausgang PP
Frequenzausgang PP	Frequenzausgang PP
Kommunikationsmodus KofiCom	
Kommunikationsmodus IO-Link	
Steuereingang	
Steuereingang Dosierfunktion	Dosierausgang

IO-Link Spezifikation

Hersteller ID:	1105 (dezimal), 0 x 0451 (hex)
Herstellername:	Kobold Messring GmbH
IO-Link Spezifikation:	V1.1
Bitrate:	COM3
Minimale Zykluszeit:	1,1 ms
SIO-Mode:	ja (OUT1 in Konfiguration IO-Link)
Blockparametrierung:	ja
Betriebsbereitschaft:	10 s
Max. Leitungslänge:	20 m

Elektrischer Anschluss MIM-…C3T



2/01 - 2021

Magnetisch induktiver Strömungsmesser in Ganzmetallausführung Typ MIM

Technische Daten (Fortsetzung)

Steuereingang: aktives Signal U_{high} max. 30 V_{DC}
0 <Low <10 V_{DC}
15 V_{DC} <High <Vs

Dosierfunktion: Dosierausgang OUT2:
Push-Pull, High aktiv
Steuereingang OUT1:
START/STOP 0,5 s <t_{high} <4 s
RESET t_{high} >5 s

Elektrischer Anschluss: Stecker M12x1, 4-polig

Schockfestigkeit
DIN EN 60068-2-27:2010: 20 g (11 ms)

Vibrationsfestigkeit
DIN EN 60068-2-6:2008: 5 g (10 … 2000 Hz)

Klimaprüfung
DIN EN 60068-2-30:2006: Schärfegrad b

Messbereichstabelle

Anschluss	Innendurchmesser (DN)	Messbereich
G ¼	2,4 x 3 mm	0,01 ... 1 l/min
G ½	5 mm	0,03 ... 3 l/min / 0,04 ... 10 l/min
G ¾	10 mm	0,1 ... 25 l/min / 0,2 ... 50 l/min
G 1	15 mm	0,2 ... 50 l/min / 0,4 ... 100 l/min
G2 / 2" NPT	siehe Abmessungszeichnung	1,5 ... 350 l/min

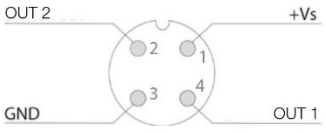
Konfiguration der Ausgänge

Ausgang 1 (OUT1, PIN 4)	Ausgang 2 (OUT2, PIN 2)
Analogausgang 4-20 mA	Analogausgang 4-20 mA
Analogausgang 0-20 mA	Analogausgang 0-20 mA
Analogausgang 2-10 V	Analogausgang 2-10 V
Analogausgang 0-10 V	Analogausgang 0-10 V
Schaltausgang NPN/PNP/PP	Schaltausgang NPN/PNP/PP
Pulsausgang PP	Pulsausgang PP
Frequenzausgang PP	Frequenzausgang PP
Kommunikationsmodus KofiCom	
Kommunikationsmodus IO-Link	
Steuereingang	
Steuereingang Dosierfunktion	Dosierausgang

IO-Link Spezifikation

Hersteller ID:	1105 (dezimal), 0 x 0451 (hex)
Herstellername:	Kobold Messring GmbH
IO-Link Spezifikation:	V1.1
Bitrate:	COM3
Minimale Zykluszeit:	1,1 ms
SIO-Mode:	ja (OUT1 in Konfiguration IO-Link)
Blockparametrierung:	ja
Betriebsbereitschaft:	10 s
Max. Leitungslänge:	20 m

Elektrischer Anschluss MIM-…C3T



2/01 - 2021

(Kobold, 2021)

5.5 Wasserdüsen

Vollstrahl-Düsen G

Flüssigkeitsdurchsatz

Charakteristik

Düsenbauröhre G mit Einlaufkonus und langer, zylindrischer Bohrung sowie eingedrehtem Mündungsschutz.
Hohe Strahlintensität mit höchstmöglicher Aufprallkraft.
Punktförmiger Vollstrahl mit definierter Strahllänge.

Anwendung

Reinigen
Mischen
Markieren
Bewegen von
Badflüssigkeiten

Werkstoffe

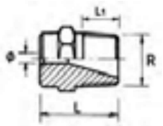
Messing
Stahl
Edelstahl
Kunststoff
andere Werkstoffe
auf Anfrage

Vollstrahl- bzw. Glattstrahl

Gew. R DIN 2999	Abmessungen (mm)		
	L	L1	SW
R 1/8“	17,5	7	14
R 1/4“	22	10,0	14
R 3/8“	25	10,0	17
R 1/2“	32	13,0	22
G 3/4“	38	15,0	30
G 1“	50	17,0	36

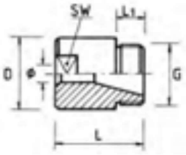
G = DIN 228
Kunststoff-Düsen können andere SW aufweisen

Abb. 1



bis Type R 1/2“

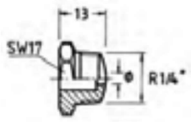
Abb. 2



ab Type G 3/4“

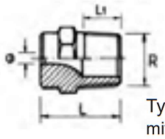
Weitere Formen (auf Anfrage):

Abb. 3



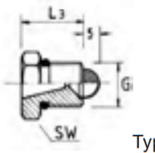
Type **GS**

Abb. 4



Type **GG**
mit speziellem Einlaufkonus

Abb. 5



Type **GB**

Volumenstrom bei Wasser 20°
Bestellbeispiel: (Gewinde - Type - Werkstoff) R 1/4“ - G 1,8 - VA

Außengewinde R oder G						Type	Volumenstrom V̇ (l/min.) bei Druck p (bar)										
R DIN 2999				G ISO 228		Bohr-Ø	0,5	1	2	3	5	7	10	15	20	30	50
1/8“	1/4“	3/8“	1/2“	3/4“	1“	(mm)	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar	bar
*	*					**G 0,5**	0,11	0,16	0,23	0,28	0,36	0,43	0,51	0,63	0,72	0,88	1,14
*	*					**G 0,8**	0,29	0,41	0,58	0,71	0,92	1,08	1,29	1,58	1,83	2,24	2,90
*	*					**G 1,0**	0,45	0,63	0,90	1,10	1,42	1,68	2,00	2,46	2,84	3,48	4,50
*	*					**G 1,2**	0,65	0,92	1,31	1,60	2,07	2,44	2,92	3,58	4,12	5,05	6,50
*	*					**G 1,5**	1,02	1,44	2,04	2,50	3,23	3,82	4,56	5,60	6,45	7,90	10,2
*	*	*				**G 1,8**	1,45	2,01	2,94	3,60	4,65	5.50	6,65	8,00	9,30	11,4	14,7
*	*	*				**G 2,0**	1,80	2,54	3,60	4,40	5,68	6,72	8,05	9,85	11,4	14,0	18,1
	*	*				**G 2,5**	2,82	3,98	5,63	6,90	8,91	10,5	12,6	15,4	17,8	21,8	28,2
	*	*				**G 3,0**	4,08	5,77	8,16	10,0	12,9	15,3	18,3	22,4	25,8	31,6	41,0
	*	*	*			**G 3,5**	5,51	7,79	11,0	13,5	17,4	20,6	24,6	30,2	35,2	42,6	55,0
	*	*	*			**G 4,0**	7,22	10,2	14,4	17,7	22,9	27,0	32,4	39,6	45,6	56,0	72,0
	*	*	*			**G 4,5**	9,18	13,0	18,4	22,5	29,1	34,4	41,0	50,0	58,0	71,0	92,0
		*	*			**G 5,0**	11,3	16,0	22,6	27,7	35,8	42,3	51,0	62,0	71,0	88,0	114
		*	*			**G 5,5**	13,7	19,3	27,3	33,5	43,2	51,2	61,0	75,0	86,0	106	137
		*	*	*		**G 6,0**	16,3	23,1	32,6	40,0	51,6	61,1	73,0	90,0	103	123	158
		*	*	*		**G 7,0**	22,0	31,2	44,1	54,0	69,7	82,5	98,0	121	139	170	220
			*	*		**G 8,0**	29,0	41,0	57,9	71,0	91,7	108	129	158	183	224	290
			*	*		**G 9,0**	36,7	51,9	73,4	90,0	116	137	165	201	232	285	368
			*	*	*	**G 10**	45,3	64,0	90,6	111	143	170	200	246	282	348	450
			*	*	*	**G 11**	54,7	77,3	109	134	173	205	245	300	346	425	550
			*	*	*	**G 12**	64,9	91,7	130	159	205	243	290	355	410	500	650
				*	*	**G 13**	76,3	108	153	187	241	286	340	418	480	590	760
				*	*	**G 14**	88,5	125	177	217	280	331	396	485	560	685	885
				*	*	**G 15**	102	144	204	250	323	382	455	560	645	790	1020
				*	*	**G 16**	116	164	232	284	367	434	520	635	730	900	1150
				*	*	**G 17**	131	185	261	320	413	489	585	715	825	1010	1310
				*	*	**G 18**	147	208	294	360	465	550	655	800	930	1140	1470
					*	**G 19**	163	231	326	400	516	611	730	890	1030	1260	1630
					*	**G 20**	181	256	361	443	572	676	810	990	1140	1400	1810
					*	**G 21**	199	282	398	488	630	745	890	1090	1260	1540	1990
					*	**G 22**	218	309	437	535	691	817	975	1190	1380	1690	2280
					*	**G 23**	239	338	477	585	755	893	1070	1300	1500	1850	2400
					*	**G 24**	261	369	522	640	826	977	1170	1430	1650	2020	2600
					*	**G 25**	282	398	563	690	891	1054	1260	1540	1780	2180	2800

(Breconcherry, 2021)

5.6 Proportionalventil

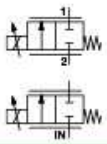
ASCO

PROPORTIONALVENTIL POSIFLOW

direkt betätigt

1/4 - 3/8

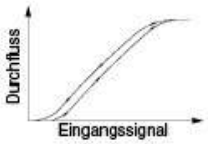
NC



2/2 Baureihe 202

MERKMALE

- *Variabler Durchfluss proportional zum Regelsignal.*
- *Kein Mindestbetriebsdruck erforderlich.*
- *Die Ventile können ohne Beeinträchtigung der Funktion in jeder beliebigen Einbaulage montiert werden.*
- *Das Ventil entspricht den geltenden EU-Richtlinien*



B

ALLGEMEINES

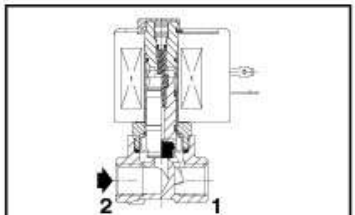
Differenzdruck Siehe "KENNDATEN" [1 bar =100 kPa]
Max. Viskosität 21 cSt (mm²/s)

Medium (*)	Temperaturbereich [2]	Dichtwerkstoff (*)
Luft, Gas, Wasser, Öl	- 10°C bis 90°C	FPM (Fluorkautschuk)

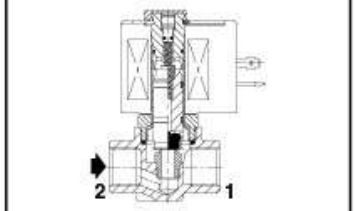
MEDIUMBERÜHRTE TEILE

(*) Die Beständigkeit der mediumberührten Teile gegenüber den verwendeten Medien ist zu überprüfen.

	Messinggehäuse	Edelstahlgehäuse
Gehäuse	Messing	Edelstahl AISI 303/1.4305
Führungsrohr	Edelstahl	Edelstahl
Magnetanker und Gegenanker	Edelstahl	Edelstahl
Federn	Edelstahl	Edelstahl
Gleitring	PTFE	PTFE
Ventilsitz	Messing	Edelstahl
Dichtung, Sitzdichtung	FPM	FPM
Remanenzscheibe	Edelstahl	Edelstahl



1/4 (Messinggehäuse)



3/8 (Messinggehäuse)

ELEKTRISCHE DATEN

Isolationsklasse (Magnet) F
Elektrischer Anschluss Leitungsdose (Kabel-Ø 6-10 mm) ISO 4400 / EN 175301-803, Bauform A
Elektrische Ausführung IEC 335
Schutzart IP65 (EN 60529)
Spannungen DC (=) : 24V (Andere Spannungen auf Anfrage.)

Vorsatz	Stromaufnahme	Nennleistung Anzug –	Halten –		warm/kalt =	Umgebungstemperatur (Magnet) [3]	Ersatzspule =	Typ [1]
	(mA)	(VA)	(VA)	(W)	(W)	(C°)	24 V DC	
SC	100 - 500	-	-	-	11 / 8	-10 bis 75	400429-040	01

Regelbereich 0 - 24 V DC
Durchflussregulierungswerte [3] 24 V DC Pulsbreitenmodulation (300 Hz) Hysterese < 5 % ; Reproduzierbarkeit < 3 % ; Ansprechempfindichkeit < 2 %

KENNDATEN

Anschluss		Nennweite	Durchflusskoeffizient Kv		Betriebsdruckdifferenz (bar) min.	max. Vakuum	max. Luft, Wasser, Öl (*)	Magnetleistung (W)	Artikel-Nr. Messing (=) Luft / Gas	Messing (=) Flüssigkeiten	Edelstahl (=) Luft / Gas	Edelstahl (=) Flüssigkeiten	Optionen EPDM	CR	PTFE
		(mm)	(m³/h)	(l/min)		=	=	=							
NC - Normal geschlossen															
1/4	G	1,2	0,05	0,8	0	1	16	8	SCG202A001V	SCG202A051V	-	-	E	J	T
	NPT								-	-	SCB202A011V	SCB202A061V	E	J	T
	G	2,4	0,12	2	0	1	8	8	SCG202A002V	SCG202A052V	-	-	E	J	T
	NPT								-	-	SCB202A012V	SCB202A062V	E	J	T
	G	3,2	0,24	4,0	0	1	4	8	SCG202A003V	SCG202A053V	-	-	E	J	T
	NPT								-	-	SCB202A013V	SCB202A063V	E	J	T
	G	4,0	0,42	7,0	0	1	2,5	8	SCG202A004V	SCG202A054V	-	-	E	J	T
	NPT								-	-	SCB202A014V	SCB202A064V	E	J	T
	G	5,6	0,72	12,0	0	1	1,4	8	SCG202A006V	SCG202A056V	-	-	E	J	T
	NPT								-	-	SCB202A016V	SCB202A066V	E	J	T
	G	7,1	0,90	15,0	0	1	1	8	SCG202A007V	SCG202A057V	-	-	E	J	T
	NPT								-	-	SCB202A017V	SCB202A067V	E	J	T
3/8	Rp	3,2	0,24	4,0	0	1	4	8	SCE202A023V	SCE202A073V	-	-	E	J	T
	NPT								-	-	SCB202A033V	SCB202A083V	E	J	T
	Rp	4,0	0,42	7,0	0	1	2,5	8	SCE202A024V	SCE202A074V	-	-	E	J	T
	NPT								-	-	SCB202A034V	SCB202A084V	E	J	T
	Rp	5,6	0,72	12,0	0	1	1,4	8	SCE202A026V	SCE202A076V	-	-	E	J	T
	NPT								-	-	SCB202A036V	SCB202A086V	E	J	T
	Rp	7,1	0,90	15,0	0	1	1	8	SCE202A027V	SCE202A077V	-	-	E	J	T
	NPT								-	-	SCB202A037V	SCB202A087V	E	J	T

(1) Siehe Maßzeichnungen auf der folgenden Seite.
(2) Bei Minustemperaturen können durch das Gefrieren des Mediums Schäden am Ventil entstehen.
(3) Maximaler Wert in Prozent bei 24 V DC-Spannungsversorgung und Pulsbreitenmodulation (300 Hz), Versorgung bei konstanter Druckdifferenz ΔP.

0021IDE-2011-R01
Änderungen vorbehalten.

Weitere Informationen unter: **www.asconumatics.de**

V115-1

ASCO

PROPORTIONALVENTIL BAUREIHE 202

SONDERAUSFÜHRUNGEN

- Die Ventile sind ebenfalls mit Dichtungen und Sitzdichtungen aus NBR (Nitril), EPDM (Ethylen-Propylen) CR (Chloropren / Neoprene) und PTFE erhältlich.
- Wasserdichtes Gehäuse mit integriertem Magnet und Schraubklemmen gemäß CEE-10, IP67.
- Exgeschützte Gehäuse für den Einsatz in den Zonen 1/21-2/22, Kategorien 2-3, gemäß ATEX-Richtlinie 94/9/EG auf Anfrage.
- Elektrische Gehäuse gemäß den NEMA-Normen.
- Montagebügel.
- Steckerverstärker für die proportionale Regelung (Artikel-Nr.: **E908A001**, siehe V150) / **X908501645001000-0200**, siehe V149)
  Merkmale:
  - Eingangssignal für die Regelung - analog: 0 - 10 V DC, 0 - 20 mA oder 4 - 20 mA.
  - Stromzufuhr für den Magnet einstellbar (= Durchfluss) entsprechend den gewünschten Regelsignalen.
  - Schließfunktion des Ventils, sobald das Regelsignal 2% unterschreitet.
  - Einstellbare Rampenfunktion.
  - Einstellbare Frequenz.
  - Ausgangsstrom unabhängig vom Magnetwiderstand und von Schwankungen in der Versorgungsspannung.
  - Einbau: Gehäuse mit Leitungsdose gemäß ISO 4400 / IP65.
- Andere Rohranschlüsse auf Anfrage.

INSTALLATION

- Die Ventile können ohne Beeinträchtigung der Funktion in jeder beliebigen Einbaulage montiert werden.
- Die Ventilgehäuse aus Messing und Edelstahl/NPT 3/8 sind mit 2 Montagebohrungen versehen.
- Die Ventilgehäuse aus Edelstahl/NPT 1/4 werden mit Montagebügel geliefert.
- Gewindeanschluss: E = Rp (ISO 7/1) ; G = G (ISO 228/1) ; B = NPT (ANSI 1.20.3)
- Montage- und Wartungsanweisungen sind jedem Ventil beigefügt.

BESTELLBEISPIELE/VENTILE

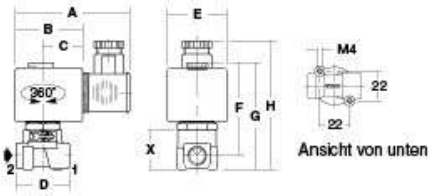
SC	G	202	A	001	V	24V / DC
SC	B	202	A	011	V	24V / DC

Vorsatz, Anschluss, Artikel-Nr., Zusatz, Spannung

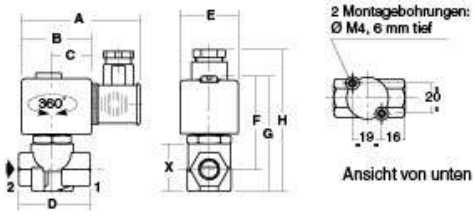
ABMESSUNGEN (mm), GEWICHTE (kg)

TYP 01
Magnet mit Vorsatz "SC"
Magnet mit Epoxidharz vergossen
IEC 335 / ISO 4400
IP65

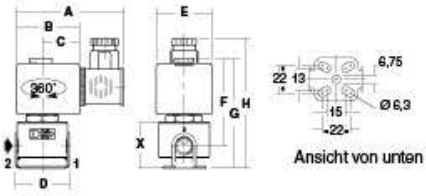
SCG202A001V/002V/003V/004V/006V/007V
SCB202A051V/052V/053V/054V/056V/057V



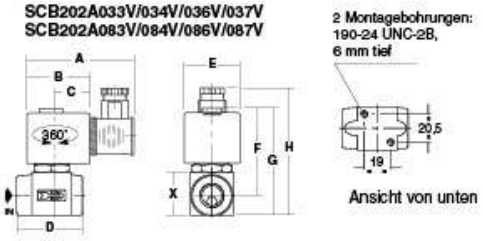
SCE202A023V/024V/026V/027V
SCE202A073V/074V/076V/077V



SCG202A011V/012V/013V/014V/016V/017V
SCB202A061V/062V/063V/064V/066V/067V



SCB202A033V/034V/036V/037V
SCB202A083V/084V/086V/087V



Typ	Vorsatz	Artikel-Nr.	A	B	C	D	E	F	G	H	X	Gewicht (1)
01	SC	SCG202A001V/002V/003V/004V/006V/007V/051V/052V/053V/054V/056V/057V	85	50	30	40	45	68	79	95	30	0,50
		SCG202A011V/012V/013V/014V/016V/017V/061V/062V/063V/064V/066V/067V	80	50	30	42	45	60	79	95	37	0,60
		SCE202A023V/024V/026V/027V/073V/074V/076V/077V	80	50	30	48	45	68	82	97	32	0,50
		SCB202A033V/034V/036V/037V/083V/084V/086V/087V	80	50	30	51	45	68	81	97	31	0,65

(1) Einschl. Magnet und Leitungsdose

0002IDE-2014/RD1
Änderungen vorbehalten.

Weitere Informationen unter: **www.asconumatics.de**

V115-2

(Ventile 24, 2021)

5.7 Planetengetriebe

FAULHABER

Planetengetriebe 0,8 Nm

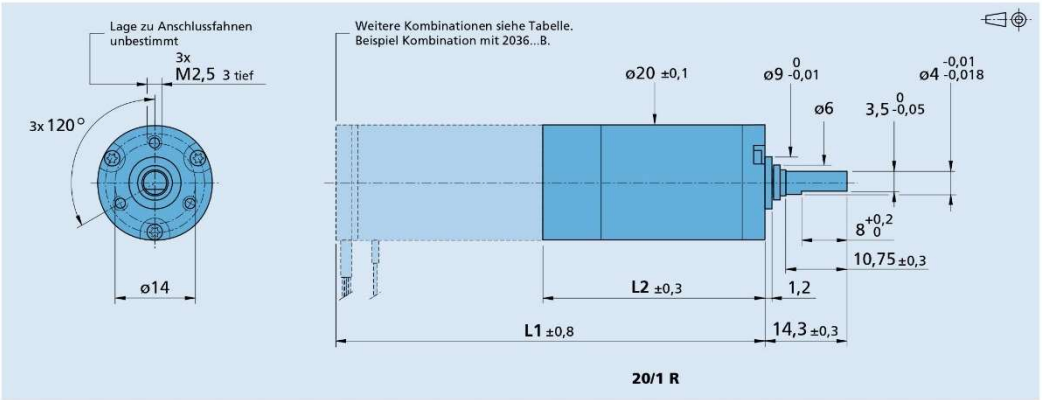
Kombinierbar mit
DC-Kleinstmotoren
Bürstenlose DC-Motoren
Schrittmotoren

Serie 20/1R

	20/1R
Gehäusewerkstoff	Stahl
Zahnräderwerkstoff	Metall
Max. empfohlene Eingangsdrehzahl für:	
– Dauerbetrieb	12 000 min^{-1}
Getriebespiel, unbelastet	≤ 1 °
Abtriebswellenlager	Kugellager, vorgespannt
Max. zulässige Wellenbelastung:	
– radial (8,5 mm vom Flansch)	≤ 75 N
– axial	≤ 20 N
Maximale Aufpresskraft	≤ 35 N
Wellenspiel:	
– radial (8,5 mm vom Flansch)	≤ 0,03 mm
– axial	= 0 mm
Betriebstemperaturbereich [1]	- 10 ... + 125 °C

Technische Daten								
Anzahl Getriebestufen		1	2	2	3	3	4	5
Dauerdrehmoment	mNm	800	800	800	800	800	800	800
Kurzzeitdrehmoment	mNm	1 100	1 100	1 100	1 100	1 100	1 100	1 100
Masse ohne Motor, ca.	g	29	39	39	49	49	59	69
Wirkungsgrad, max.	%	88	80	80	70	70	60	55
Drehsinn der Welle, Antrieb zu Abtrieb		=	=	=	=	=	=	=
Untersetzung [2] (gerundet)		**3,71:1**	**9,7:1 14:1**	**23:1**	**43:1 66:1**	**86:1**	**112:1 134:1 159:1 190:1 246:1**	**415:1 592:1 989:1 1 526:1**
L2 [mm] = Getriebelänge [3]		18,4	23,5	23,5	28,6	28,6	33,7	38,8
L1 [mm] = Länge mit Motor	1741U...CXR	59,6	64,7	64,7	69,8	69,8	74,9	80,0
	2224U...SR	42,6	47,7	47,7	52,8	52,8	57,9	63,0
	2232U...SR	50,6	55,7	55,7	60,8	60,8	65,9	71,0
	1645U...BHS	63,8	68,9	68,9	74,0	74,0	79,1	84,2
	1660U...BHS/BHT	78,8	83,9	83,9	89,0	89,0	94,1	99,2
	2036U...B	54,4	59,5	59,5	64,6	64,6	69,7	74,8
	2057S...B	77,3	82,4	87,9	87,5	93,0	92,6	97,7
	2214S...BXTH	37,3	42,4	47,9	47,5	53,0	52,6	57,7
	2214S...BXTR	36,5	41,6	47,1	46,7	52,2	51,8	56,9
	AM2224...10	46,1	51,2	51,2	56,3	56,3	61,4	66,5

[1] Betriebstemperaturbereich - 45 ... + 100 °C ist mit Option - K2823 zu bestellen.
[2] Die angegebenen Untersetzungsverhältnisse sind gerundet, exakte Werte sind auf Anfrage oder unter www.faulhaber.com erhältlich.
[3] L2 + 1,9 mm bzw. 7,4 mm, in Kombination mit 2057S...B und 2214...BXT R/H.



Angaben zu Lebensdauer sowie weitere technische Erläuterungen siehe „Technische Informationen".
Edition 2020 Feb. 18

© DR. FRITZ FAULHABER GMBH & CO. KG
Änderungen vorbehalten
www.faulhaber.com

(Faulhaber, 2021)

5.8 Rillenkugellager W 61806-2RS1

SKF Erstellt von www.skf.com am 2021-05-08

W 61806-2RS1 Rillenkugellager

Rillenkugellager

Lagerdaten

Toleranzen:,

Normal (metrisch), P6, P5, Normal (Zoll),

Radialluft:,

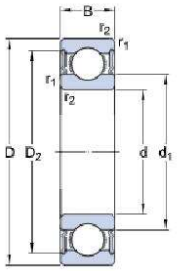
Zusammengepasste Lagerpaare, Nichtrostender Stahl d < 10 mm, Sonstige Lager

Gestaltung der Lagerumbauteile

Passungsempfehlungen,

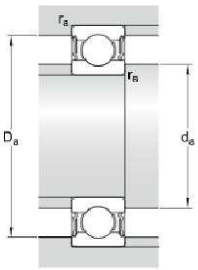
Toleranzen und Passung

Technische Spezifikationen



ABMESSUNGEN

d	30 mm
D	42 mm
B	7 mm
d_1	≈ 33.11 mm
d_2	≈ 33.11 mm
D_2	≈ 39.2 mm
$r_{1,2}$	min. 0.3 mm



ANSCHLUSSMASSE

d_a	min. 32 mm
d_a	max. 33 mm
D_a	max. 40 mm
r_a	max. 0.3 mm

SKF Seite 1 von 3

BERECHNUNGSDATEN

Dynamische Tragzahl	C	3.58 kN
Statische Tragzahl	C_0	2.9 kN
Ermüdungsgrenzbelastung	P_u	0.125 kN
Grenzdrehzahl		9 500 r/min
Berechnungsfaktor	k_r	0.02
Berechnungsfaktor	f_0	14.1

GEWICHT

Gewicht Lager	0.024 kg

Weitere Informationen

Produktdetails

- Einreihige Rillenkugellager
- Einreihige Rillenkugellager aus nichtrostendem Stahl
- Einreihige Rillenkugellager mit Einfüllnuten
- Zweireihige Rillenkugellager
- Lagerdaten
- Belastungen
- Temperaturgrenzwerte
- Zulässige Drehzahlen
- Bezeichnungsschema

Konstruktionsinformationen

- Entwurf von Lagerungen
- Allgemeines Lagerwissen
- Lagerauswahlprozess
- Gestaltung der Lagerumbauteile
- Passungsempfehlungen
- Wahl der Lagerluft
- Schmierung
- Abdichtung, Ein- und Ausbau
- Lagerausfall und wie Sie ihn verhindern

Werkzeuge

- Bearing Select
- SimPro Quick
- Engineering Calculator
- LubeSelect für SKF Schmierfette
- Hilfsmittel zur Auswahl von Anwärmgeräten
- Ein- und Ausbauanleitung für Wälzlager

Nutzungsbedingungen

Mit dem Zugriff auf diese Website/App der SKF Gruppe (zur SKF Gruppe – nachfolgend „SKF" genannt – gehören AB SKF und alle Tochtergesellschaften von AB SKF) akzeptieren Sie die nachstehenden Bedingungen:

Eingeschränkte Haftung und Haftungsausschluss

Obwohl äußerste Sorgfalt bei der Erstellung dieser Website/App aufgewendet wurde, übernimmt SKF keine Haftung, INSBESONDERE KEINE HAFTUNG FÜR DEREN MARKTGÄNGIGKEIT ODER EIGNUNG FÜR EINEN BESTIMMTEN ZWECK. Sie sind sich bewusst, dass Sie diese Website/App auf eigenes Risiko verwenden und die uneingeschränkte Verantwortung für alle im Zusammenhang mit der Nutzung der Website/App anfallenden Kosten übernehmen, und dass SKF nicht für direkte, indirekte, zufällige oder Folgeschäden haftet, die sich im Zusammenhang mit Ihrem Zugriff auf diese Website/App oder die Verwendung dieser Website/App oder die Verwendung der auf dieser Website/App angebotenen Software ergeben. Für alle von Ihnen erworbenen oder genutzten Produkte oder Dienstleistungen von SKF gelten die auf dieser Website/App für diese Produkte oder Dienstleistungen vereinbarten Nutzungsbedingungen. SKF gibt in Bezug auf Websites/Apps Dritter, auf die in unserer Website/App hingewiesen wird oder zu denen der Zugang über Hyperlinks möglich ist, keine Garantien betreffend die Korrektheit oder Verlässlichkeit der in diesen Websites/Apps enthaltenen Materialien ab und übernimmt keine Verantwortung für solche Materialien. Darüber hinaus SKF garantiert nicht, dass diese Website/App oder die auf dieser Website/App verlinkten Websites/Apps frei von Viren oder anderen schädlichen Elementen sind.

Urheberrecht

Das Urheberrecht an den Inhalten dieser Website/App einschließlich aller hierin angebotenen Informationen und Programme liegt bei SKF oder Lizenzgebern von SKF. Alle Rechte vorbehalten. Für lizenziertes Material wird grundsätzlich der Lizenzgeber angegeben, der SKF das Nutzungsrecht eingeräumt hat. Die vollständige oder teilweise Vervielfältigung, Übertragung, Verbreitung oder Speicherung des Inhalts dieser Website/App in jedweder Form bedarf der ausdrücklichen vorherigen schriftlichen Zustimmung durch SKF. Natürliche Personen sind jedoch zur Vervielfältigung, Speicherung und Übertragung ohne vorherige schriftliche Zustimmung durch SKF berechtigt. Die Informationen und Programme auf dieser Website dürfen Dritten nicht zugänglich gemacht werden.
Diese Website /App enthält bestimmte Bilder unter Lizenz von Shutterstock, Inc.

Marken und Patente

Alle auf dieser Website/App aufgeführten Marken, Markennamen und Unternehmenszeichen sind Eigentum von SKF oder von Lizenzgebern. Sie dürfen nicht ohne vorherige schriftliche Zustimmung von SKF verwendet werden. Für alle auf dieser Website/App aufgeführten lizenzierten Marken wird der Lizenzgeber angegeben, der SKF das Nutzungsrecht an der Marke eingeräumt hat. Der Zugriff auf diese Website/App stellt keine Lizenz- oder Patentgewährung für Lizenzen oder Patente dar, die sich im Eigentum von SKF befinden oder von SKF lizenziert wurden.

Änderungen

SKF behält sich vor, nach freiem Ermessen Änderungen oder Ergänzungen an der Website/App vorzunehmen.

(SKF, 2021)

5.9 Rillenkugellager W 6001-2RSL

SKF Erstellt von www.skf.com am 2021-05-31

6001-2RSL Rillenkugellager

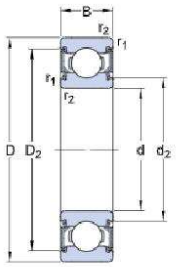
Beliebtes Produkt
SKF Explorer

Rillenkugellager

Lagerdaten
Toleranzen:,
Normal (metrisch), P6, P5, Normal (Zoll),
Radialluft:,
Zusammengepasste Lagerpaare, Nichtrostender Stahl d < 10 mm, Sonstige Lager

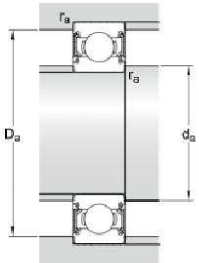
Gestaltung der Lagerumbauteile
Passungsempfehlungen,
Toleranzen und Passung

Technische Spezifikationen



ABMESSUNGEN

d	12 mm
D	28 mm
B	8 mm
d_2	≈ 14.75 mm
D_2	≈ 24.72 mm
$r_{1,2}$	min. 0.3 mm



ANSCHLUSSMASSE

d_a	min. 14 mm
d_a	max. 15 mm
D_a	max. 26 mm
r_a	max. 0.3 mm

BERECHNUNGSDATEN

Dynamische Tragzahl	C	5.4 kN
Statische Tragzahl	C_0	2.36 kN
Ermüdungsgrenzbelastung	P_u	0.1 kN
Referenzdrehzahl		60 000 r/min
Grenzdrehzahl		30 000 r/min
Berechnungsfaktor	k_r	0.025
Berechnungsfaktor	f_0	13

GEWICHT

Gewicht Lager	0.021 kg

Weitere Informationen

Produktdetails

- Einreihige Rillenkugellager
- Einreihige Rillenkugellager aus nichtrostendem Stahl
- Einreihige Rillenkugellager mit Einfüllnuten
- Zweireihige Rillenkugellager
- Lagerdaten
- Belastungen
- Temperaturgrenzwerte
- Zulässige Drehzahlen
- Bezeichnungsschema

Konstruktionsinformationen

- Entwurf von Lagerungen
- Allgemeines Lagerwissen
- Lagerauswahlprozess
- Gestaltung der Lagerumbauteile
- Passungsempfehlungen
- Wahl der Lagerluft
- Schmierung
- Abdichtung, Ein- und Ausbau
- Lagerausfall und wie Sie ihn verhindern

Werkzeuge

- Bearing Select
- SimPro Quick
- Engineering Calculator
- LubeSelect für SKF Schmierfette
- Hilfsmittel zur Auswahl von Anwärmgeräten
- Ein- und Ausbauanleitung für Wälzlager

Nutzungsbedingungen

Mit dem Zugriff auf diese Website/App der SKF Gruppe (zur SKF Gruppe – nachfolgend „SKF" genannt – gehören AB SKF und alle Tochtergesellschaften von AB SKF) akzeptieren Sie die nachstehenden Bedingungen:

Eingeschränkte Haftung und Haftungsausschluss

Obwohl äußerste Sorgfalt bei der Erstellung dieser Website/App aufgewendet wurde, übernimmt SKF keine Haftung, INSBESONDERE KEINE HAFTUNG FÜR DEREN MARKTGÄNGIGKEIT ODER EIGNUNG FÜR EINEN BESTIMMTEN ZWECK. Sie sind sich bewusst, dass Sie diese Website/App auf eigenes Risiko verwenden und die uneingeschränkte Verantwortung für alle im Zusammenhang mit der Nutzung der Website/App anfallenden Kosten übernehmen, und dass SKF nicht für direkte, indirekte, zufällige oder Folgeschäden haftet, die sich im Zusammenhang mit Ihrem Zugriff auf diese Website/App oder die Verwendung dieser Website/App oder die Verwendung der auf dieser Website/App angebotenen Software ergeben. Für alle von Ihnen erworbenen oder genutzten Produkte oder Dienstleistungen von SKF gelten die auf dieser Website/App für diese Produkte oder Dienstleistungen vereinbarten Nutzungsbedingungen. SKF gibt in Bezug auf Websites/Apps Dritter, auf die in unserer Website/App hingewiesen wird oder zu denen der Zugang über Hyperlinks möglich ist, keine Garantien betreffend die Korrektheit oder Verlässlichkeit der in diesen Websites/Apps enthaltenen Materialien ab und übernimmt keine Verantwortung für solche Materialien. Darüber hinaus SKF garantiert nicht, dass diese Website/App oder die auf dieser Website/App verlinkten Websites/Apps frei von Viren oder anderen schädlichen Elementen sind.

Urheberrecht

Das Urheberrecht an den Inhalten dieser Website/App einschließlich aller hierin angebotenen Informationen und Programme liegt bei SKF oder Lizenzgebern von SKF. Alle Rechte vorbehalten. Für lizenziertes Material wird grundsätzlich der Lizenzgeber angegeben, der SKF das Nutzungsrecht eingeräumt hat. Die vollständige oder teilweise Vervielfältigung, Übertragung, Verbreitung oder Speicherung des Inhalts dieser Website/App in jedweder Form bedarf der ausdrücklichen vorherigen schriftlichen Zustimmung durch SKF. Natürliche Personen sind jedoch zur Vervielfältigung, Speicherung und Übertragung ohne vorherige schriftliche Zustimmung durch SKF berechtigt. Die Informationen und Programme auf dieser Website dürfen Dritten nicht zugänglich gemacht werden.
Diese Website /App enthält bestimmte Bilder unter Lizenz von Shutterstock, Inc.

Marken und Patente

Alle auf dieser Website/App aufgeführten Marken, Markennamen und Unternehmenszeichen sind Eigentum von SKF oder von Lizenzgebern. Sie dürfen nicht ohne vorherige schriftliche Zustimmung von SKF verwendet werden. Für alle auf dieser Website/App aufgeführten lizenzierten Marken wird der Lizenzgeber angegeben, der SKF das Nutzungsrecht an der Marke eingeräumt hat. Der Zugriff auf diese Website/App stellt keine Lizenz- oder Patentgewährung für Lizenzen oder Patente dar, die sich im Eigentum von SKF befinden oder von SKF lizenziert wurden.

Änderungen

SKF behält sich vor, nach freiem Ermessen Änderungen oder Ergänzungen an der Website/App vorzunehmen.

(SKF, 2021)

6 Zahnradberechnung mit KISSsoft

KISSsoft

KISSsoft Release 2019 C

KISSsoft Hochschullizenz Hochschule Luzern (Horw)

Datei

Name : Stirnräder_Waschanlage
Geändert von: saemi am: 07.05.2021 um: 16:33:58

Berechnung eines geradverzahnten Stirnradpaares

Zeichnungs- oder Artikelnummer:			
Rad 1:		0.000.0	
Rad 2:		0.000.0	
Rechenmethode		Statische Berechnung	
		Rad 1	Rad 2
Leistung (mW)	[P]	4600.000	
Drehzahl (1/min)	[n]	108.0	45.0
Drehmoment (Nm)	[T]	0.407	0.976
Anwendungsfaktor	[KA]	1.00	
Geforderte Lebensdauer (h)	[H]	0.00	
Rad treibend (+) / getrieben (-)		+	-
Arbeitsflanke Rad 1:		Rechte Flanke	
Drehrichtung Rad 1:		im Uhrzeigersinn	

Zahngeometrie und Werkstoff

Geometrieberechnung nach		ISO 21771:2007, DIN ISO 21771	
		Rad 1	Rad 2
Achsabstand (mm)	[a]	43.000	
Achsabstandstoleranz		ISO 286:2010 Abmass js7	
Normalmodul (mm)	[mn]	1.0000	
Normaleingriffswinkel (°)	[αn]	20.0000	
Schrägungswinkel am Teilkreis (°)	[β]	0.0000	
Zähnezahl	[z]	25	60
Zahnbreite (mm)	[b]	5.00	5.00
Schrägungsrichtung		Geradverzahnt	
Verzahnungsqualität	[Q-ISO 1328:2013]	A6	A6
Innendurchmesser (mm)	[di]	0.00	0.00
Innendurchmesser der Bandage (mm)	[dbi]	0.00	0.00

Werkstoff

Rad 1
PEEK (VDI2736), Thermoplast (POM, PPA, etc.), unbehandelt
VDI2736 [S C]

Rad 2
PEEK (VDI2736), Thermoplast (POM, PPA, etc.), unbehandelt
VDI2736 [S C]

		Rad 1	Rad 2
Zahnfuss-Temperatur (°C)	[TR]	70.0	70.0
Flankentemperatur (°C)	[TF]	70.0	70.0
Bruchfestigkeit (N/mm²)	[σB]	134.36	134.36
Streckgrenze (N/mm²)	[σS]	77.73	77.73
Elastizitätsmodul (N/mm²)	[E]	3640	3640

1/8

KISSsoft

Poissonzahl	[v]	0.400	0.400
Mittenrauhwert Ra, Flanke (µm)	[RAH]	0.00	0.00
Mittenrauhwert Ra, Fuss (µm)	[RAF]	0.00	0.00
Gemittelte Rauhtiefe Rz, Flanke (µm)	[RZH]	0.00	0.00
Gemittelte Rauhtiefe Rz, Fuss (µm)	[RZF]	0.00	0.00

Bezugsprofil von Rad 1 :

Bezugsprofil	1.25 / 0.38 / 1.0 ISO 53:1998 Profil A		
Fusshöhenfaktor	[hfP*]	1.250	
Fussradiusfaktor	[ρfP*]	0.380	(ρfPmax*= 0.472)
Kopfhöhenfaktor	[haP*]	1.000	
Kopfradiusfaktor	[ρaP*]	0.000	
Protuberanzhöhenfaktor	[hprP*]	0.000	
Protuberanzwinkel	[αprP]	0.000	
Kopfformhöhenfaktor	[hFaP*]	0.000	
Kantenbrechflankenwinkel	[αKP]	0.000	
	nicht überschneidend		

Bezugsprofil von Rad 2 :

Bezugsprofil	1.25 / 0.38 / 1.0 ISO 53:1998 Profil A		
Fusshöhenfaktor	[hfP*]	1.250	
Fussradiusfaktor	[ρfP*]	0.380	(ρfPmax*= 0.472)
Kopfhöhenfaktor	[haP*]	1.000	
Kopfradiusfaktor	[ρaP*]	0.000	
Protuberanzhöhenfaktor	[hprP*]	0.000	
Protuberanzwinkel	[αprP]	0.000	
Kopfformhöhenfaktor	[hFaP*]	0.000	
Kantenbrechflankenwinkel	[αKP]	0.000	
	nicht überschneidend		

Angaben für die Fertigbearbeitung

Fusshöhe Bezugsprofil	[hfP*]	1.250	1.250
Fussradius Bezugsprofil	[ρfP*]	0.380	0.380
Kopfhöhe Bezugsprofil	[haP*]	1.000	1.000
Protuberanzhöhenfaktor	[hprP*]	0.000	0.000
Protuberanzwinkel (°)	[αprP]	0.000	0.000
Kopfformhöhenfaktor	[hFaP*]	0.000	0.000
Kantenbrechflankenwinkel (°)	[αKP]	0.000	0.000

Art der Profilkorrektur:	keine (nur Einlaufbetrag)				
Kopfrücknahme, durch Einlaufen (µm)	[Ca L/R]	20.4	/20.4	20.4	/20.4

Schmierungsart	Trockenlauf	
Umgebungstemperatur (°C)	[TU]	20.000

Zahnradpaar

Gesamtübersetzung	[itot]	-2.400	
Zähnezahlverhältnis	[u]	2.400	
Stirnmodul (mm)	[mt]	1.000	
Stirneingriffswinkel (°)	[αt]	20.000	
Betriebseingriffswinkel (°)	[αwt]	21.757	
	[αwt.e/i]	21.798 /	21.715
Betriebseingriffswinkel im Normalschnitt (°)	[αwn]	21.757	
Schrägungswinkel am Wälzkreis (°)	[βw]	0.000	

2/8

KISSsoft

Grundschrägungswinkel (°)	[βb]	0.000
Nullachsabstand (mm)	[ad]	42.500
Teilkreisteilung (mm)	[pt]	3.142
Grundkreisteilung (mm)	[pbt]	2.952
Stirneingriffsteilung (mm)	[pet]	2.952
Profilverschiebungsfaktorsumme	[Σxi]	0.5213
Profilüberdeckung	[εα]	1.602
Profilüberdeckung mit Abmassen	[εα.e/m/i]	1.613 / 1.592 / 1.572
Sprungüberdeckung	[εβ]	0.000
Gesamtüberdeckung	[εγ]	1.602
Gesamtüberdeckung mit Abmassen	[εγ.e/m/i]	1.613 / 1.592 / 1.572
Länge der Eingriffsstrecke (mm)	[ga, e/i]	4.728 (4.762 / 4.639)
Länge T1-A (mm)	[T1A]	1.883 (1.850 / 1.951)
Länge T1-B (mm)	[T1B]	3.659 (3.659 / 3.638)
Länge T1-C (mm)	[T1C]	4.688 (4.678 / 4.698)
Länge T1-D (mm)	[T1D]	4.835 (4.802 / 4.903)
Länge T1-E (mm)	[T1E]	6.611 (6.611 / 6.590)
Länge T2-A (mm)	[T2A]	14.055 (14.055 / 14.022)
Länge T2-B (mm)	[T2B]	12.279 (12.246 / 12.334)
Länge T2-C (mm)	[T2C]	11.251 (11.227 / 11.275)
Länge T2-D (mm)	[T2D]	11.103 (11.103 / 11.070)
Länge T2-E (mm)	[T2E]	9.327 (9.293 / 9.382)
Länge T1-T2 (mm)	[T1T2]	15.939 (15.905 / 15.972)
Minimale Berührlinienlänge (mm)	[Lmin]	5.000

Rad 1

Profilverschiebungsfaktor	[x]	0.0000
Zahndicke, Bogen, in Modul, Modul	[sn*]	1.5708
Kopfhöhenänderung (mm)	[k*mn]	-0.021
Teilkreisdurchmesser (mm)	[d]	25.000
Grundkreisdurchmesser (mm)	[db]	23.492
Kopfkreisdurchmesser (mm)	[da]	26.958
(mm)	[da.e/i]	26.958 / 26.937
Kopfkreisabmasse (mm)	[Ada.e/i]	0.000 / -0.021
Kopfformkreisdurchmesser (mm)	[dFa]	26.958
(mm)	[dFa.e/i]	26.958 / 26.937
Fusskreisdurchmesser (mm)	[df]	22.500
Erzeugungsprofilverschiebungsfaktor	[xE.e/i]	-0.0742/ -0.1154
Erzeugter Fusskreis mit xE (mm)	[df.e/i]	22.352 / 22.269
Fussformkreisdurchmesser (mm)	[dFf]	23.647
(mm)	[dFf.e/i]	23.602 / 23.580
Evolventenlänge (mm)	[l_dFa-l_dFf]	1.783
Kopfhöhe, $m_n(h_{aP}^*+x+k)$ (mm)	[ha]	0.979
(mm)	[ha.e/i]	0.979 / 0.968
Fusshöhe (mm)	[hf=mn*(hfP*-x)]	1.250
(mm)	[hf.e/i]	1.324 / 1.365
Zahnhöhe (mm)	[h]	2.229
Ersatz-Zähnezahl	[zn]	25.000

3/8

KISSsoft

Normalzahndicke am Kopfkreis (mm)	[san]	0.742	
(mm)	[san.e/i]	0.695 /	0.652
Normalzahndicke am Kopfformkreis (mm)	[sFan]	0.742	
(mm)	[sFan.e/i]	0.695 /	0.652
Normal-Lückenweite am Fusskreis (mm)	[efn]	0.000	
(mm)	[efn.e/i]	0.000 /	0.000

Rad 2

Profilverschiebungsfaktor	[x]	0.5213	
Zahndicke, Bogen, in Modul, Modul	[sn*]	1.9503	
Kopfhöhenänderung (mm)	[k*mn]	-0.021	
Teilkreisdurchmesser (mm)	[d]	60.000	
Grundkreisdurchmesser (mm)	[db]	56.382	
Kopfkreisdurchmesser (mm)	[da]	63.001	
(mm)	[da.e/i]	63.001 /	62.971
Kopfkreisabmasse (mm)	[Ada.e/i]	0.000 /	-0.030
Kopfformkreisdurchmesser (mm)	[dFa]	63.001	
(mm)	[dFa.e/i]	63.001 /	62.971
Fusskreisdurchmesser (mm)	[df]	58.543	
Erzeugungsprofilverschiebungsfaktor	[xE.e/i]	0.4252/	0.3702
Erzeugter Fusskreis mit xE (mm)	[df.e/i]	58.350 /	58.240
Fussformkreisdurchmesser (mm)	[dFf]	59.101	
(mm)	[dFf.e/i]	58.935 /	58.842
Evolventenlänge (mm)	[l_dFa-l_dFf]	2.111	
Kopfhöhe, $m_n(h_{aP}^*+x+k)$ (mm)	[ha]	1.500	
(mm)	[ha.e/i]	1.500 /	1.485
Fusshöhe (mm)	[hf=mn*(hfP*-x)]	0.729	
(mm)	[hf.e/i]	0.825 /	0.880
Zahnhöhe (mm)	[h]	2.229	
Ersatz-Zähnezahl	[zn]	60.000	
Normalzahndicke am Kopfkreis (mm)	[san]	0.714	
(mm)	[san.e/i]	0.656 /	0.599
Normalzahndicke am Kopfformkreis (mm)	[sFan]	0.714	
(mm)	[sFan.e/i]	0.656 /	0.599
Normal-Lückenweite am Fusskreis (mm)	[efn]	0.697	
(mm)	[efn.e/i]	0.710 /	0.719

Radspezifische Paardaten Zahnradpaar 1, Rad 1

Wälzkreisdurchmesser (mm)	[dw]	25.294	
(mm)	[dw.e/i]	25.301 /	25.287
Kopfnutzkreisdurchmesser (mm)	[dNa]	26.958	
(mm)	[dNa.e/i]	26.958 /	26.937
Kopfspiel theoretisch (mm)	[c]	0.250	
Kopfspiel effektiv (mm)	[c.e/i]	0.424 /	0.333
Fussnutzkreisdurchmesser (mm)	[dNf]	23.792	
(mm)	[dNf.e/i]	23.814 /	23.782
Reserve (dNf-dFf)/2 (mm)	[cF.e/i]	0.117 /	0.090
Max. Gleitgeschwindigkeit am Kopf (m/s)	[vga]	0.031	
Spezifisches Gleiten am Kopf	[ζa]	0.412	
Spezifisches Gleiten am Fuss	[ζf]	-2.110	
Mittleres spezifisches Gleiten	[ζm]	0.570	
Gleitfaktor am Kopf	[Kga]	0.215	
Gleitfaktor am Fuss	[Kgf]	-0.314	
Wälzwinkel zu dFa (°)	[χ_dFa.e/i]	32.250 /	32.145

KISSsoft

Wälzwinkel zu dNa (°)	[χ_dNa.e/i]	32.250 /	32.145	
Wälzwinkel zu dNf (°)	[χ_dNf.e/i]	9.515 /	9.022	
Wälzwinkel zu dFf (°)	[χ_dFf.e/i]	5.535 /	4.947	
Durchmesser Einzeleingriffspunkt B (mm)	[d-B]	24.606 (	24.606 /	24.593)
Durchmesser Einzeleingriffspunkt D (mm)	[d-D]	25.405 (	25.379 /	25.457)
Kopfüberdeckung	[ε]	0.652 (	0.655 /	0.641)

Radspezifische Paardaten Zahnradpaar 1, Rad 2

Wälzkreisdurchmesser (mm)	[dw]	60.706	
(mm)	[dw.e/i]	60.724 /	60.688
Kopfnutzkreisdurchmesser (mm)	[dNa]	63.001	
(mm)	[dNa.e/i]	63.001 /	62.971
Kopfspiel theoretisch (mm)	[c]	0.250	
Kopfspiel effektiv (mm)	[c.e/i]	0.393 /	0.311
Fussnutzkreisdurchmesser (mm)	[dNf]	59.387	
(mm)	[dNf.e/i]	59.422 /	59.366
Reserve (dNf-dFf)/2 (mm)	[cF.e/i]	0.290 /	0.216
Max. Gleitgeschwindigkeit am Kopf (m/s)	[vga]	0.045	
Spezifisches Gleiten am Kopf	[ζa]	0.678	
Spezifisches Gleiten am Fuss	[ζf]	-0.701	
Mittleres spezifisches Gleiten	[ζm]	0.570	
Gleitfaktor am Kopf	[Kga]	0.314	
Gleitfaktor am Fuss	[Kgf]	-0.215	

Wälzwinkel zu dFa (°)	[χ_dFa.e/i]	28.566 /	28.498	
Wälzwinkel zu dNa (°)	[χ_dNa.e/i]	28.566 /	28.498	
Wälzwinkel zu dNf (°)	[χ_dNf.e/i]	19.069 /	18.888	
Wälzwinkel zu dFf (°)	[χ_dFf.e/i]	17.438 /	17.112	
Durchmesser Einzeleingriffspunkt B (mm)	[d-B]	61.498 (	61.471 /	61.542)
Durchmesser Einzeleingriffspunkt D (mm)	[d-D]	60.597 (	60.597 /	60.572)
Kopfüberdeckung	[ε]	0.950 (	0.958 /	0.931)

Allgemeine Einflussfaktoren

		------- Rad 1	---------- Rad 2 --
Nennumfangskraft im Teilkreis (N)	[Ft]	32.5	
Axialkraft (N)	[Fa]	0.0	
Radialkraft (N)	[Fr]	11.8	
Normalkraft (N)	[Fnorm]	34.6	
Nennumfangskraft pro mm (N/mm)	[w]	6.51	
Nur zur Information: Kräfte im Wälzkreis:			
Nennumfangskraft (N)	[Ftw]	32.2	
Axialkraft (N)	[Faw]	0.0	
Radialkraft (N)	[Frw]	12.8	
Umfangsgeschwindigkeit Teilkreis (m/s)	[v]	0.14	
Umfangsgeschwindigkeit Wälzkreis (m/s)	[v(dw)]	0.14	

Dynamikfaktor		[Kv]	1.000
Breitenfaktoren	- Flanke	[KHβ]	1.000
	- Zahnfuss	[KFβ]	1.000
	- Fressen	[KBβ]	1.000
Stirnfaktoren	- Flanke	[KHα]	1.000
	- Zahnfuss	[KFα]	1.000

5/8

KISSsoft

- Fressen	[KBα]	1.000	

Zahnfuss-Tragfähigkeit

Rechnung der Zahnformfaktoren nach Methode: B

		Rad 1	Rad 2	
Berechnet mit Erzeugungsprofilverschiebungsfaktor	[xE.e]	-0.0742	0.4252	
Zahnformfaktor	[YF]	1.70	1.28	
Kraftangriffswinkel (°)	[αFen]	19.26	22.31	
Biegehebelarm (mm)	[hF]	1.10	1.14	
Zahnfussdicke (mm)	[sFn]	1.98	2.29	
Zahnfussradius (mm)	[ρF]	0.59	0.42	
Biegehebelarm (-)	[hF/mn]	1.103	1.136	
Zahnfussdicke (-)	[sFn/mn]	1.978	2.290	
Zahnfussradius (-)	[ρF/mn]	0.586	0.416	
Kraftangriffsdurchmesser (mm)	[d_{en}]	25.405	61.498	
Berechnungsquerschnitt-Durchmesser (mm)	[d_{sFn}]	22.764	58.716	
Tangente am Berechnungsquerschnitt (°)	[α_{sFn}]	30.000	30.000	
Kerbparameter	[q_s]	1.687	2.755	
Überdeckungsfaktor	[Yε]	1.000		
Schrägenfaktor	[Yβ]	1.000		
Hochverzahnungs-Faktor	[YDT]	1.000		
Zahnkranz-Faktor	[YB]	1.00	1.00	
Massgebende Zahnbreite (mm)	[beff]	5.00	5.00	
Zahnfuss-Nennspannung (N/mm²)	[σF0]	11.06	8.32	
Zahnfussspannung (N/mm²)	[σF]	11.06	8.32	

Berechnungsformeln: σF0 = Ft / beff / mn * YF * Yε * Yβ * YB * YDT
σF = σF0 * KA (Kv = KFα = KFβ = 1.0)
YF, YB, YDT : ISO 6336-3:2006 (YS = 1.0)

Streckgrenze (N/mm²)	[σS]	77.73	77.73	
Bruchfestigkeit (N/mm²)	[σB]	134.36	134.36	
Daten aus Datei σS1:Z014-108.DAT				
Daten aus Datei σB1:Z014-108.DAT				
Daten aus Datei σS2:Z014-108.DAT				
Daten aus Datei σB2:Z014-108.DAT				
Zahnfuss-Temperatur (°C)	[TR]	70.0	70.0	
Sicherheit gegen bleibende Verformung	[Ss=σS/σF]	7.03	9.34	
Sicherheit bezüglich Bruchfestigkeit	[Sb=σB/σF]	12.15	16.15	

Für Kunststoffe (VDI2736):

Berechnungsformel: σF0 = Ft / beff / mn * YF * YS * Yε * Yβ				
Spannungskorrekturfaktor	[YS]	1.77	2.25	
Zahnfussspannung (N/mm²)	[σF]	19.54	18.73	
Sollsicherheit	[SSmin(plastic)]	1.50		
	[SBmin(plastic)]	2.00		
Zulässige Zahnfussspannung (N/mm²)	[σFP,sS]	155.45	155.45	
(N/mm²)	[σFP,sB]	268.73	268.73	
Berechnungsformel:	σFP,sS = 2.0*σS/SSmin; σFP,sB = 2.0*σB/SBmin			
Sicherheit gegen bleibende Verformung	[Ss=σFP,sS/σF]	7.95	8.30	>= 1.5
Sicherheit bezüglich Bruchfestigkeit	[Sb=σFP,sB/σF]	13.75	14.35	>= 2.0

Prüfmasse für die Zahndicke

6/8

KISSsoft

		------- Rad 1	---------- Rad 2 --
Zahndickentoleranz		DIN 3967 cd25	DIN 3967 cd25
Zahndickenabmass im Normalschnitt (mm)	[As.e/i]	-0.054 /-0.084	-0.070 /-0.110
Messzähnezahl	[k]	3.000	8.000
Zahnweite spielfrei (mm)	[Wk]	7.730	23.338
Effektive Zahnweite (mm)	[Wk.e/i]	7.680 / 7.652	23.272 / 23.235
(mm)	[ΔWk.e/i]	-0.051 / -0.079	-0.066 / -0.103
Messkreisdurchmesser (mm)	[dMWk.m]	24.711	60.989
Theoretischer Messkörperdurchmesser (mm)	[DM]	1.713	1.776
Effektiver Messkörperdurchmesser (mm)	[DMeff]	1.750	2.000
Radiales Einkugelmass spielfrei (mm)	[MrK]	13.739	32.141
Radiales Einkugelmass (mm)	[MrK.e/i]	13.676 / 13.640	32.064 / 32.019
Messkreisdurchmesser (mm)	[dMMr.m]	24.928	61.272
Diametrales Zweikugelmass spielfrei (mm)	[MdK]	27.427	64.283
Diametrales Zweikugelmass (mm)	[MdK.e/i]	27.301 / 27.230	64.127 / 64.037
Diametrales Rollenmass spielfrei (mm)	[MdR]	27.427	64.283
Diametrales Rollenmass nach DIN 3960 (mm)	[MdR.e/i]	27.301 / 27.230	64.127 / 64.037
Mass über 3 Rollen, axial, nach AGMA 2002 (mm)	[dk3A.e/i]	27.301 / 27.230	64.127 / 64.037
Dreirollenmass spielfrei (mm)	[Md3R]	27.377	0.000
Effektives Dreirollenmass (mm)	[Md3R.e/i]	27.251 / 27.180	0.000 / 0.000
Zahndickensehne spielfrei (mm)	[sc]	1.570	1.950
Effektive Zahndickensehne (mm)	[sc.e/i]	1.517 / 1.487	1.881 / 1.841
Höhe über der Sehne ab da.m (mm)	[ha]	0.998	1.509
Zahndicke, Bogen (mm)	[sn]	1.571	1.950
(mm)	[sn.e/i]	1.517 / 1.487	1.880 / 1.840
Spielfreier Achsabstand (mm)	[aControl.e/i]	42.841 / 42.749	
Spielfreier Achsabstand, Abmasse (mm)	[jta]	-0.159 / -0.251	
dNf.i mit aControl (mm)	[dNf0.i]	23.613	58.969
Reserve (dNf0.i-dFf.e)/2 (mm)	[cF0.i]	0.006	0.017
Kopfspiel (mm)	[c0.i(aControl)]	0.095	0.073
Achsabstandsabmass (mm)	[Aa.e/i]	0.013 / -0.013	
Verdrehflankenspiel aus Aa (mm)	[jtw_Aa.e/i]	0.010 / -0.010	
Radialspiel (mm)	[jrw.e/i]	0.263 / 0.147	
Verdrehflankenspiel (Stirnschnitt) (mm)	[jtw.e/i]	0.206 / 0.115	
Normalflankenspiel (mm)	[jn.e/i]	0.191 / 0.108	
Verdrehspielwinkel am Antrieb bei festgehaltenem Abtrieb:			
Gesamter Verdrehspielwinkel (°)	[j.tSys]	0.9344/0.5232	

Verzahnungstoleranzen

		------- Rad 1	---------- Rad 2 --
Nach ISO 1328-1:2013, ISO 1328-2:1997			
Verzahnungsqualität	[Q-ISO1328:2013]	A6	A6
Teilungs-Einzelabweichung (µm)	[fptT]	7.50	7.50
Grundkreis-Teilungsabweichung (µm)	[fpbT]	7.20	7.30
Teilungsspannen-Abweichung über k/8 (µm)	[Fpk/8T]	15.00	16.00
Profil-Formabweichung (µm)	[ffαT]	8.00	8.00
Profil-Winkelabweichung (µm)	[fHαT]	6.50	6.50
Profil-Gesamtabweichung (µm)	[FαT]	10.00	10.00
Flankenlinien-Formabweichung (µm)	[ffβT]	7.50	8.00
Flankenlinien-Winkelabweichung (µm)	[fHβT]	7.00	7.50
Flankenlinien-Gesamtabweichung (µm)	[FβT]	10.00	11.00

7/8

KISSsoft

Teilungs-Gesamtabweichung (µm)	[FpT]	22.00	24.00
Teilungssprung (µm)	[fuT]	11.00	11.00
Rundlaufabweichung (µm)	[FrT]	20.00	22.00
Einflanken-Wälzabweichung (µm)	[FisT]	30.00	32.00
Einflanken-Wälzsprung (µm)	[fisT]	7.50	7.50
Zweiflanken-Wälzabweichung (µm)	[FidT]	21.00	26.00
Zweiflanken-Wälzsprung (µm)	[fidT]	5.00	5.00

FidT (Fi"), fidT (fi") nach ISO1328:1997 berechnet mit den geometrischen Mittelwerten für mn und d

Achslagetoleranzen, Empfehlung nach ISO TR 10064-3:1996, Qualität 6

Maximalwert für Achsschränkung (µm)	[fΣβ]	11.00	(Fβ=	11.00)
Maximalwert für Achsneigung (µm)	[fΣδ]	22.00		

Korrekturen und Bestimmung der Zahnform

Daten zur Zahnformberechnung:
Daten nicht vorhanden.
Bitte führen Sie eine Berechnung im Tab "Zahnform" aus und öffnen Sie das Hauptprotokoll erneut.

Bemerkungen:

- Angaben mit [.e/i] bedeuten: Maximal- [e] und Minimalwert [i] bei Berücksichtigung aller Toleranzen
  Angaben mit [.m] bedeuten: Mittelwert in der Toleranz
- Beim Flankenspiel werden die Achsabstandstoleranzen und die Zahndickenabmasse berücksichtigt.
  Angegeben wird das maximale und das minimale Spiel entsprechend den grössten, beziehungsweise kleinsten Abmassen.
  Die Berechnung erfolgt für den Wälzkreis.

Ende Protokoll Zeilen: 444

8/8

7 Werkstoffe

7.1 PEEK

PEEK
POLYETHERETHERKETON

TECHNISCHES DATENBLATT

Werkstoffbeschreibung
PEEK ist ein teilkristalliner Thermoplast und zählt zur Gruppe der Hochleistungskunststoffe. Sein ausgesprochen breites Anwendungsspektrum, auch für hochbeanspruchte Bauteile, zeichnet diesen Kunststoff aus. PEEK verfügt über ein optimales Verhältnis von Steifigkeit, Festigkeit, Zähigkeit, geringer Kriechneigung und hohem E-Modul. PEEK eignet sich dank hervorragendem Gleit- und Abriebverhalten für Anwendungen als Lager und Führungen. Seine hohe Chemikalien- und Hydrolysebeständigkeit, sowie die Resistenz gegen hochenergetische Strahlen öffnen PEEK eine Vielzahl von Anwendungen, die bisher den Metallen vorbehalten waren. PEEK ist zudem schwer entflammbar, klebbar und schweissbar.

Anwendungsgebiete
Vielseitige Anwendung für hochbeanspruchte Teile in Medizin, Chemie, Industrie, Sport, Luft und Raumfahrt. Zum Beispiel Gleitlager und -Ringe, Dichtungen, O-Ringe, Manschetten, Gehäuse, Kolben, Isolatoren, Spulenkörper, Pumpenteile, Ventile.

Zulassungen
Erfüllt die Richtlinien der FDA.

UV-Beständigkeit
Gute UV-Beständigkeit

Physikalische Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfmethode
Dichte	1.32	g/cm³	DIN EN ISO 1183-1
Feuchtigkeitsaufnahme	0.2	%	DIN EN ISO 62
Mechanische Eigenschaften			
Streckspannung	100	N/mm²	DIN EN ISO 527
Reissdehnung	25	%	DIN EN ISO 527
E-Modul (Zug)	4000	N/mm²	DIN EN ISO 527
Kerbschlagzähigkeit (Charpy)	7	kJ/m²	DIN EN ISO 179
Kugeldruckhärte	230	N/mm²	DIN EN ISO 2039-1
Thermische Eigenschaften			
Wärmeleitfähigkeit	0.25	W/K.m	DIN 52612
Spezifische Wärmekapazität	1.34	kJ/(kgK)	
Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	4.7	10 −5 x 1/K	DIN 53752
Einsatztemperatur kurzzeitig maximal	300	°C	
Einsatztemperatur langfristig	-60 bis 250	°C	
Brennbarkeit	V0		UL 94
Elektrische Eigenschaften			
Spezifischer Durchgangswiderstand	4.9×10^{16}	Ω cm	DIN IEC 60093
Oberflächenwiderstand	10^{18}	Ω	DIN IEC 60093
Durchschlagfestigkeit	20	kV/mm	DIN IEC 60243

Diese technischen Daten sind durch unsere Lieferanten, aus vielen Einzelmessungen, als Durchschnittswerte ermittelt worden. Bei allen Messungen sind die Probekörper im trockenen Zustand geprüft worden. Die Daten geben wir unter Vorbehalt weiter. Die Tabelle erhebt keinen Aspruch auf Vollständigkeit und Richtigkeit. Die Materialtechnologie ist einer ständigen Weiterentwicklung unterworfen. Irgendwelche Rechte und Garantien können daraus nicht abgeleitet werden. Eigene Versuche sind notwendig, da die Umwelt- und Einsatzbedingungen (Feuchtigkeit, Temperatur, mechanische Kräfte, Strahlen und Chemikalien etc.) Grenzen in der Anwendung setzen.

Amsler & Frey AG Feldstrasse 26 CH-5107 Schinznach-Dorf T +41 (0)56 463 60 70 F +41 (0)56 463 60 79 info@amsler-frey.ch www.amsler-frey.ch

Stand 01.08.2016

(Amsler & Frey AG, 2021)

7.2 PLA

SWISSFIL®

Technisches Datenblatt Polylactide (PLA)

Generelle Materialeigenschaften

PLA ist ein aus Biomasse hergestellter Kunststoff, der biologisch abbaubar ist und sich in vielen organischen Lösungsmitteln auflösen lässt. Es besitzt eine hohe UV-Beständigkeit sowie eine geringe Flammbarkeit. Die Fähigkeit, Wasser aufzunehmen ist ebenfalls gering und der Kunststoff bleibt bis gegen 60°C formbeständig.

Verarbeitungsparameter

Düsentemperatur	190°C – 220°C
Druckbetttemperatur	20°C – 70°C, 50°C – 70°C empfohlen
Durchmesser	2.85 / 1.75 mm
Trocknungstemperatur	80°C
Trocknungszeit	2 – 4 Stunden

Materialeigenschaften im Detail

Eigenschaft / Grösse	Wert	Einheit	Norm / Testmethode
Physikalisch / Mechanisch			
Dichte	1.24	g/cm^3	ASTM D792
Streckspannung	60	MPa	ASTM D882
Streckdehnung	6%		ASTM D882
Reissdehnung	100%		ASTM D882
Zug E-Modul	3800	MPa	ASTM D790
Thermisch			
Max. Temperatur Formbeständigkeit	55	°C	ASTM D648
Max. Temperatur Gebrauch			
- Dauernd	45	°C	
- Kurzzeit	60	°C	
Wärmeleitkoeffizient	0.18	W/(K·m)	
Brennbarkeit	V-2		UL94

DIM3NSIONS GmbH, Feldstrasse 29, CH-8904 Aesch ZH V21.02.2019

(Swissfil, 2021)

8 Beschlussprotokolle

22.02.2021
16.00-17.15 Uhr

Beschlussprotokoll der Zoom Session vom 22.02.21

Anwesend:

Prof. Dr. Johann Lodewyks (Dozent HSLU)

Jochen Schlag (Belimed Life Science AG)

Jürgen Althammer (Belimed Life Science AG)

Samuel Geisseler (Student HSLU)

Anforderungen / Informationen bezüglich «Entwicklung eines Systems zur Kontrolle eines Sprüharms in einer Reinigungsanlage»

- Zwangsgeführte Rotation von Wascharmen für die Aussenreinigung
- Wasserdruck beträgt 0.8-1.7 bar
- Volumenstrom Wasser gesamte Maschine 15'000-40'000 l/h
    - Die kleinste Anlage hat 2 Sprüharme, hinzu kommt noch, dass der Waschgutträger auch mit Wasser durchflossen wird und kleine Wasserdüsen hat, sodass maximal 1/3 des Volumenstroms durch einen Wascharm fliesst - also max 5'000 l/h was 1,39l pro Sekunde entspricht.
- Ziel: regelbare Geschwindigkeit des Sprüharmes, Reproduzierbarkeit der Drehbewegung, Umkehrung der Drehbewegung, konstante Drehgeschwindigkeit soll erreicht werden und Protokollierbarkeit des Prozesses
- Keine Düsen entwickeln - vorhandene Düsen der Wascharme sollten erhalten bleiben
- Materialanforderungen werden noch zugestellt
- Verschiedene Wasserqualitäten werden verwendet: Reinwasser/Reinstwasser
- Dem Reinigungswasser wird Reinigungsmittel hinzugefügt
- Reinigungskontrolle mit Leitfähigkeitsmessung des Wassers
- Als Beispiel: Belimed Life Science verwendet Magnetkupplungen in anderen Maschinen, aber aktuell nicht in Reinigungsanlagen
- Antrieb soll möglichst ohne Änderungen der aktuelle Platzverhältnisse eingebaut werden können
- Anlage PH 820.2 als Referenzanlage
- Antriebseinheit kann teilweise ausserhalb des Reinigungsraumes verbaut werden, aber nicht in jedem Fall
- Druckluft steht zur Verfügung (max. 6-8 bar) mit 1-2 bar wird die Druckluftleitung ausgeblasen, bedeutet aber nicht, dass nicht ein höherer Druck zu Verfügung steht. Der Druck wird gedrosselt für das Ausblasen
- Soll Drehzahl der Reinigungsarme: 30-40 U/min
- Evtl. Schnittstellen zur Elektronik der Anlage definieren - Steuerung muss Schnittstelle zu SPS aufweisen
- Drehzahlsensor ist aktuell aussen am Reinigungsarm montiert (Induktiv)
- Funktionsmodell zur Überprüfung der Funktion
- Regelung liegt nicht im Umfang dieser Arbeit
- Tank-Innenreinigungsorgane werden nicht geändert
- Reinigungswassertemperatur beträgt 15-93 °C

22.02.2021
16.00-17.15 Uhr

Zu erledigen bis zum nächsten Meeting

Samuel Geisseler

- Anforderungsliste erstellen
- Recherche bezüglich des Antriebes starten

Belimed Life Science AG (Jochen Schlag / Jürgen Althammer)

- Materialanforderungen zusammenstellen und angeben
- Nach Unterzeichnung der Geheimhaltung wird 3D-PDF einer Reinigungsanlage zur Verfügung gestellt

Alle

- Vereinbarung und Geheimhaltungsvertrag unterzeichnen

Nächstes Meeting ist für den 08.03.2021 zur selben Zeit (16.00-17.00 Uhr) über Zoom angesetzt.

Buttisholz, 22.02.21

S. Geisseler

Samuel Geisseler

08.03.2021
16.00-17.15 Uhr

Beschlussprotokoll der Zoom Session vom 08.03.2021

Anwesend:

Prof. Dr. Johann Lodewyks (Dozent HSLU)

Jochen Schlag (Belimed Life Science AG)

Jürgen Althammer (Belimed Life Science AG)

Samuel Geisseler (Student HSLU)

Besprochene Themen

- Die Anforderungsliste wurde besprochen und einzelne Änderungen und Ergänzungen vorgenommen:
  - Bei der Drehgeschwindigkeit des Sprüharmes wurde der zulässige Bereich auf 25 bis 45 U/min erhöht und eine Toleranz von ±5% festgelegt
  - Als maximale Regelzeit für die gewünschte Drehzahl wurden 10s festgelegt
  - Der Wasserströmungsquerschnitt darf nicht geändert werden, sodass der Durchfluss gewährleistet wird
  - Die Temperatur kann beim Trocknungsvorgang 120°C erreichen, somit müssen die Materialien diese Temperatur ertragen können
  - Als Antriebsenergie liegt elektrische Spannung von 400V 50Hz und 24V DC vor
  - Die Materialanforderungen und die Klassifizierungen der Reinigungsmedien werden noch ergänzt
- Der Morphologische Kasten mit den Ideen aus dem Brainstorming wurde besprochen
- Bei den Bauteilen sind Hinterdrehungen, Gewinde oder komplizierte Mechanismen nicht erwünscht, wegen der schlechten Zugänglichkeit für dessen Reinigung
- Die Drehzahl der Reinigungsarme wird bis anhin mit einem Signalimpuls pro Umdrehung gemessen
- Es gibt bei den Reinigungsanlagen ein spezielles Programm, welches «Pulsationsspülung» genannt wird und dabei abwechslungsweise Wasser und Druckluft durch die Reinigungsdüsen strömt, dabei wird der Druck des Mediums nicht erfasst
- Das Fraunhofer-Institut hat eine Arbeit über die Rotation von Reinigungsarmen geschrieben, bei der evtl. hilfreiche Daten entnommen werden können.

08.03.2021
16.00-17.15 Uhr

Zu erledigen bis zum nächsten Meeting

Samuel Geisseler

- Anforderungsliste ergänzen und abschliessen
- Recherche bezüglich Pneumatik und Elektrik als Antriebsformen durchführen
- Recherche bezüglich Digitalventilen für Wasser/Druckluft durchführen
- Morphologischer Kasten umgestalten, damit dieser übersichtlicher wird
- Erste Konzeptkombinationen zusammenstellen, ausdetaillieren und bewerten

Belimed Life Science AG (Jochen Schlag / Jürgen Althammer)

- Ergänzungen bei der Anforderungsliste machen

Das nächste Meeting ist für den 22.03.2021 zur selben Zeit (16.00-17.00 Uhr) über Zoom angesetzt.

Buttisholz, 08.03.2021

S. Geisseler

Samuel Geisseler

22.03.2021
16.00-17.05 Uhr

Beschlussprotokoll der Zoom Session vom 22.03.2021

Anwesend:

Prof. Dr. Johann Lodewyks (Dozent HSLU)

Jochen Schlag (Belimed Life Science AG)

Jürgen Althammer (Belimed Life Science AG)

Samuel Geisseler (Student HSLU)

Besprochene Themen

- Bei der Anforderungsliste wurden die geänderten Punkte nochmal besprochen und die Anforderung an die Regelzeit von 10 Sekunden von Fest zur Wunschanforderung geändert. Dies, weil die 10 Sekunden eine Schätzung darstellen und zu dessen Überprüfung ein Regler konstruiert werden müsste, was nicht im Umfang dieser Arbeit enthalten ist.
- Die Lösungskombinationen aus den verschiedenen Morphologischen Kästen wurden angeschaut und diskutiert. Dabei stellte sich heraus, dass der Antrieb mit Druckluft und einem Windrad aufgrund des grossen Luftverbrauches nicht geeignet ist. Aus diesem Grund werden diese nicht weiter verfolgt. Hingegen bekam der Antrieb mit Wasser gute Rückmeldungen.
- Eine freiliegende Verzahnung bei einer nötigen Übersetzung ist nicht erwünscht, da diese nur schwer gereinigt werden kann und Platz für ungewollte Ablagerungen bietet.
- Eine Winkelverstellung von Steuerdüsen wird nicht mehr weiter verfolgt, da dies eine aufwändige Mechanik bedingt und viele bewegliche Teile mit sich bringt. Aufgrund der vielen Einzelteile kann eine Verschmutzung des Reinigungsgutes durch Abrieb der Mechanik nicht mit Sicherheit verhindert werden und der konstruktive Aufwand ist dafür zu gross.
- Eine weitere Antriebsmöglichkeit bietet ein Wassermotor. Dieser sollte wenn möglich ins Lösungskonzept miteinbezogen werden.
- Zur Berechnung der Antriebsleistung sollte das Trägheitsmoment der Reinigungsarme bestimmt werden. Dafür wird ein reales Modell der Reinigungsarme benötigt, um dies berechnen und experimentell bestimmen zu können.

22.03.2021
16.00-17.05 Uhr

Zu erledigen bis zum nächsten Meeting

Samuel Geisseler

- Finale Anforderungsliste als PDF an alle Teilnehmer senden
- Morphologische Kästen als PDF an alle Teilnehmer senden
- Bei den Skizzen die Teile/Räume, welche mit dem Reinigungsmedium nicht in Kontakt kommen, farblich kennzeichnen
- Recherche bezüglich Wassermotor durchführen
- Recherche bezüglich Schrittmotor durchführen

Belimed Life Science AG (Jochen Schlag / Jürgen Althammer)

- Abklären, ob ein kompletter Reinigungsarm zu Versuchszwecken zur Verfügung gestellt werden kann.

Das nächste Meeting ist für den 29.03.2021 zur selben Zeit (16.00-17.00 Uhr) über Zoom angesetzt.

Buttisholz, 23.03.2021

S. Geisseler

Samuel Geisseler

29.03.2021
16.00-17.00 Uhr

Beschlussprotokoll der Zoom Session vom 29.03.2021

Anwesend:

Prof. Dr. Johann Lodewyks (Dozent HSLU)

Jürgen Althammer (Belimed Life Science AG)

Samuel Geisseler (Student HSLU)

Abwesend:

Jochen Schlag (Belimed Life Science AG)

Besprochene Themen

- Die Anwesenden wurden über die Besprechung zwischen Samuel Geisseler Jochen Schlag vom letzten Freitag und dessen Ergebnisse informiert:
  - Der Medienfluss und der Aufbau des Antriebes der Reinigungsanlage wurden schematisch dargestellt
  - Kuppelbarkeit zwischen einem Rack und der Reinigungsanlage sollte mit eingeplant werden
  - Kabellose Stromübertragung als Möglichkeit bei dem elektrischen Antrieb
  - Geplanter Versuchsaufbau ohne Rack, sondern mit Reinigungsarm einer Spülmaschine
- Die einzelnen Materialien (AlSi 316L bei Metallteilen und PVDF bei Kunststoffteilen), die Lagerung und Montage der Reinigungsarme wurden besprochen
- Der Anforderungskatalog wird mit dem Erforderlichkeit der Kopplung zwischen einem Rack und der Reinigungsanlage nicht ergänzt, da die Sprüharmkontrolle evtl. bei einem Rack nicht verbaut wird.
- Bei einem fluidischen Antrieb kann anstatt eines Proportionalventils eine Proportionaldrossel verwendet werden.
- Die Kapselung des Antriebes mit Wasser bietet den Vorteil, dass die Mechanik besser vor äusseren Einflüssen geschützt werden kann.
- Beim Bewertungsrechner der Lösungskombinationen (Excel-Sheet) wurden die Kriterien GMP-Konformität, Antriebsverhalten und Störverhalten ergänzt.
- Durch die numerische Bewertung und Diskussionen wurden vier Lösungskombinationen für eine weitere Konzeptausarbeitung ausgewählt:
  - Pneumatischer Antrieb mit einem Pneumatik Motor
  - Wasserhydraulischer Antrieb mit direkt montieren Wasserschaufeln
  - Wasserhydraulischer Antrieb mit Wasserrad und Übersetzung
  - Elektrischer Antrieb mit einem Schrittmotor

29.03.2021
16.00-17.00 Uhr

Zu erledigen bis zum nächsten Meeting

Samuel Geisseler

- Die ausgewählten Lösungskombinationen weiter ausarbeiten und vertiefen
- Nach Möglichkeit erste Versuche bezüglich dem dynamischen Verhalten der verschiedenen Antriebsvarianten machen
- Zwischenpräsentation vorbereiten

Der Termin für das nächste Meeting steht noch nicht fest. Er wird von Herrn Lodewyks so bald als möglich bekannt gegeben.

Buttisholz, 29.03.2021

S. Geisseler
Samuel Geisseler

19.04.2021
16.00-17.00 Uhr

Beschlussprotokoll der Zoom Session vom 19.04.2021

Anwesend:

Jochen Schlag (Belimed Life Science AG)

Jürgen Althammer (Belimed Life Science AG)

Samuel Geisseler (Student HSLU)

Abwesend:

Prof. Dr. Johann Lodewyks (Dozent HSLU)

Besprochene Themen

- Jürgen Althammer wurden die bei der Zwischenpräsentation besprochenen Punkte erläutert, damit er auf dem selben Wissensstand ist wie die anderen Teilnehmer.
- Es wurden Versuche mit den bestehenden Lösungskonzepten durchgeführt, welche die Störanfälligkeit der einzelnen Systeme aufzeigen sollen. Dabei hat sich herausgestellt, dass der Pneumatik- und Elektromotor sehr resistent gegen äussere Störungen sind. Bei den Wasserantrieben zeigte der Antrieb mit Getriebeübersetzung das beste Störverhalten aufgrund des höheren Antriebsmomentes.
- Die Störanfälligkeit des Wasserrades ohne Getriebe könnte weiter reduziert werden, wenn dieses durch einen Deckel gegen äusseres Spritzwasser geschützt würde.
- Die Drehzahlmessung ist ein Knackpunkt, der zu bewältigen ist. Die Messung sollte eine möglichst hohe Signalfrequenz aufweisen um die Drehzahl des Wascharmes genau bestimmen zu können. Zudem sollte diese Messmethode auch auf den Racks funktionieren. Eine gute Lösung wäre, dass der Wascharm bei den fluidischen Antrieben mit einem der Steuerung hinterlegten Volumenstrom beschleunigt wird und die Drehzahl über die bestehende Sensorik gemessen wird. Nach der Beschleunigungsphase können dann noch kleine Änderungen des Volumenstromes durch die Regelung vorgenommen werden um die korrekte Drehzahl zu erhalten.
- Es wurde ein Getriebe besprochen, das gut zu reinigen ist und wenig Schmutzablagerungsmöglichkeiten bietet, damit es nicht gekapselt werden muss. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass ein Getriebe allein aufgrund des Abriebes gekapselt werden sollte.
- Beim Wasserantrieb könnte der Wasserverbrauch der Anlage konstant gehalten oder sogar reduziert werden, weil durch diesen Antrieb die Antriebsbohrungen des Wascharmes wegfallen und dieser Volumenstrom für das Wasserrad verwendet werden kann.
- Der Pneumatik Motor hat Vorteile bezüglich der Kompaktheit des Antriebes. Jedoch wurden bei der Recherche keine Motoren gefunden, die eine Temperatur von 120°C aushalten. Es werden nun noch die Pneumatik Firmen Festo, SMC und Bürkert zu Pneumatik Motoren mit einer Wasserbeständigkeit und Temperaturfestigkeit bis 120°C angefragt.

19.04.2021
16.00-17.00 Uhr

- Der Antrieb durch einen Elektromotor wird aufgrund der Wasser- und Temperaturbeständigkeit und des Kupplungsaufwandes für ein Rack nicht mehr weiterverfolgt.

Zu erledigen bis zum nächsten Meeting

Samuel Geisseler

- Versuche bezüglich des Wasserrades ohne Getriebe durchführen. Dabei wird das Wasserrad durch einen Deckel abgeschirmt, sodass Störeinflüsse eine geringere Wirkung haben sollten.
- Die Firmen Festo, SMC und Bürkert werden zu den Pneumatik Motoren angefragt, um herauszufinden, ob Motoren mit einer Temperaturfestigkeit von 120°C und Wasserbeständigkeit lieferbar sind.
- Die Drehzahlmessung wird nochmals recherchiert

Das auszuarbeitende Lösungskonzept muss nach dem nächsten Meeting fest stehen, damit dieses ausgearbeitet werden kann.

Das nächste Meeting ist für den 26.04.2021 von 15.00 bis 16.00 über Zoom angesetzt, um neue Erkenntnisse und das weitere Vorgehen besprechen zu können.

Buttisholz, 20.04.2021

S. Geisseler
Samuel Geisseler

26.04.2021
15.30-16.20 Uhr

Beschlussprotokoll der Zoom Session vom 26.04.2021

Anwesend:

Prof. Dr. Johann Lodewyks (Dozent HSLU)

Jürgen Althammer (Belimed Life Science AG)

Jochen Schlag (Belimed Life Science AG)

Samuel Geisseler (Student HSLU)

Besprochene Themen

- Es ist kein Pneumatik Motor, der alle Anforderungen erfüllt, von Festo, SNC oder Bürkert lieferbar. Die jeweiligen Mitarbeiter des Kundendienstes konnten auch auf keine spezifische Firma mit solchen Motoren hinweisen. Aus diesem Grund kommt der Pneumatische Antrieb für dieses Konzept nicht in Frage.
- Es wurden Volumenstrommessungen mit einer 2 mm und einer 3 mm Düse durchgeführt. Diese Messresultate dienen als Berechnungsgrundlage für die Auslegung eines Antriebes mit Wasser.
- Das Antriebsmoment des bestehenden Wascharmes wurde aufgrund der Volumenstrommessungen berechnet. Somit sind die benötigten Leistungswerte bekannt.
- Aufgrund des geforderten Antriebsmomentes ist ein Wasserrad-Antrieb mit Getriebeübersetzung für dieses Projekt am Besten geeignet. Alle Teilnehmenden sind der Überzeugung, dass die Ziele mit dieser Antriebsart erreicht werden können. Aus diesem Grund wird der Antrieb mit einem Wasserrad und Getriebeübersetzung als Konzept festgelegt.
- Es wurden erste Berechnungen zu den Antriebsleistungen und Wasserradauslegungen mittels Excel-Berechnung vorgestellt.
- Beim Design des Antriebes und dessen Abdeckungen muss auf ein hygienisches Design (GMP-Konformität) geachtet werden.
- Die Verzahnung des Getriebes sollte vorzugsweise aus PEEK-Kunststoff bestehen
- Ein Funktionsmodell soll bis spätestens zur Abschlusspräsentation fertig sein, damit die Funktionen geprüft werden können.
- Ein Abschlussplakat soll ohne Details gemacht werden, da dieses Projekt der Geheimhaltung unterliegt.
- CAD-Konstruktionen und Entwicklungsschritte sollten kurz per Mail mit Jochen Schlag und Jürgen Althammer ausgetauscht werden, damit Rücksprache gehalten werden kann und allfällige Änderungen schnellstmöglich vorgenommen werden können.

26.04.2021
15.30-16.20 Uhr

Zu erledigen bis zum nächsten Meeting

Samuel Geisseler

- Bei der Excel-Berechnung zu den Antriebsmomenten die Leistungen ergänzen, um Wirkungsgrade bestimmen zu können.
- Mit der Auslegung des Antriebes starten

Der Termin für das nächste Meeting ist der 10.05.2021 von 11.00 bis 12.00 Uhr.

Buttisholz, 26.04.2021

S. Geisseler
Samuel Geisseler

10.05.2021
11.00-12.00 Uhr

Beschlussprotokoll der Zoom Session vom 10.05.2021

Anwesend:

Prof. Dr. Johann Lodewyks (Dozent HSLU)

Jochen Schlag (Belimed Life Science AG)

Samuel Geisseler (Student HSLU)

Abwesend:

Jürgen Althammer (Belimed Life Science AG)

Besprochene Themen

- Die CAD-Konstruktion der Antriebseinheit wurde besprochen. Dabei wurden folgende Änderungen vorgeschlagen:
  - Madenschraubensicherung des grossen Stirnrades wird weggelassen.
  - Gewindebolzen für Halterung des Getriebegehäuses anstelle Sechskantschrauben verwenden.
  - Alle Ecken beim Gehäuse mit Radien versehen, damit da kein Wasser hängen bleibt.
  - Beim unteren Getriebegehäuseteil kann Hohlraum ausgefüllt werden. Damit wird die Fertigung einfacher.
  - Die Seitenwand des Gehäusedeckels kann weiter nach unten gezogen werden
  - Der Deckel wird nur auf das Gehäuse geschoben und hält durch Reibung. Damit können Schrauben vermieden werden. Der Deckel ist unbelastet.
- 3D-Regel für Rohre beachten (Biegeradius=3*Rohrdurchmesser)
- Normteile können bestellt werden, damit so bald wie möglich mit dem Bau des Funktionsmodells begonnen werden kann.
- Belimed Life Science bezieht Wasserventile von den Firmen Leser und Bürkert. Von da können evtl. Ventile bezogen werden.
- Um eine Patentanmeldung vorantreiben zu können, sollte eine Patentskizze gemacht werden.

10.05.2021
11.00-12.00 Uhr

Zu erledigen bis zum nächsten Meeting

Samuel Geisseler

- Konstruktion gemäss vorgeschlagenen Änderungen anpassen
- Teile für Bestellung auflisten und an Jochen Schlag senden
- Patentskizze des Antriebes machen
- Recherche bezüglich geeigneten Wasserventilen durchführen

Der Termin für das Abschlussmeeting ist der 17.05.2021 von 16.00 bis 17.00 Uhr.

Buttisholz, 10.05.2021

S. Geisseler
Samuel Geisseler

17.05.2021
16.00-16.50 Uhr

Beschlussprotokoll des Abschlussmeetings vom 17.05.2021

Anwesend:

Prof. Dr. Johann Lodewyks (Dozent HSLU)

Jürgen Althammer (Belimed Life Science AG)

Samuel Geisseler (Student HSLU)

Abwesend:

Jochen Schlag (Belimed Life Science AG)

Besprochene Themen

- Jürgen Althammer wurde auf den aktuellen Stand der Konstruktion und deren Änderungen gebracht.
- Der aktuelle Stand des Projektes wurde besprochen:
  - Der CAD-Entwurf ist soweit fertig.
  - Die ersten Kunststoffteile wurden mit dem 3D-Drucker hergestellt.
  - Die Normteile und das Planetengetriebe wurden bestellt.
  - Das öffentliche Präsentationsdokument wurde geschrieben und kann von allen durchgelesen werden. Bei Fehlern des Dokumentes bezüglich des Projektes oder der Geheimhaltung wird dieses noch angepasst.
- Eine Teststrategie für das Testen des Funktionsmodelles wurde aufgestellt:
  - Es werden verschiedene Wasserräder mit unterschiedlich grossen Peltonschaufeln verwendet um die optimale Grösse der Schaufeln zu finden.
  - Die Düsengrössen und Anzahl Düsen wird verändert um die optimalste Kombination zu finden.
  - Es werden verschiedene Störgrössen getestet: Wasser von oben/von der Seite
  - Mittels Beschleunigungsversuchen und einer definierten Trägheit des Systems wird die effektive Antriebsleistung mit der theoretischen verglichen und daraus ein Wirkungsgrad bestimmt.
  - Eine Blockade des Wascharmes wird simuliert und dessen Auswirkungen auf das Antriebssystem beobachtet.
  - Mit der Antriebsleistung kann die Kraft des Wassers auf die Wasserschaufeln und somit die Belastung des Wasserrades ermittelt werden.
  - Der Wasserverbrauch wird mittels Volumenstrommessungen für verschiedene Betriebspunkte bestimmt.
  - Die Versuche werden mit und ohne Wasser im Wascharm durchgeführt um dessen Einfluss bestimmen zu können.
- Die Abgabe der Dokumentation der Konzepterarbeitung ist der 11. Juni. Die Dokumente sind ausschliesslich elektronisch einzureichen.

17.05.2021
16.00-16.50 Uhr

- Da eine vollumfängliche Durchführung der Tests mit dem Funktionsmodell voraussichtlich bis zum 11. Juni nicht möglich ist, wird der Testbericht mit allen Resultaten bis zur Abschlusspräsentation nachgereicht.

Es wird kein nächstes Meeting mehr stattfinden, weil das Schulsemester am 04. Juni zu Ende ist und dieses Meeting als Abschlussmeeting durchgeführt wurde.

Besten Dank für die tolle Zusammenarbeit und die Unterstützung

Buttisholz, 17.05.2021

S. Geisseler
Samuel Geisseler

9 Literaturverzeichnis

Amsler & Frey AG. (01. 05 2021). Von https://www.amsler-frey.ch/resources/td_peek.pdf abgerufen

Armak Motoren. (22. 03 2021). Von http://armakmotor.de/Neues/articles/bergbau-lokomotive-mit-armak-drehkolben-druckluftmotoren-und-hydraulischer-bremse-150.html abgerufen

Axum. (22. 03 2021). Von https://www.axnum.ch/produkte/schraubtechnik-druckluftmotoren/druckluftmotoren/ abgerufen

Breconcherry. (24. 05 2021). Von www.breconcherry.de abgerufen

Farnell. (10. 06 2021). Von https://www.farnell.com/datasheets/1682209.pdf abgerufen

Faulhaber. (10. 06 2021). Von https://www.faulhaber.com/fileadmin/Import/Media/DE_20-1R_FMM.pdf abgerufen

Kobold. (24. 05 2021). Von www.kobold.com abgerufen

promoco. (10. 06 2021). Von http://www.promoco-motors.com/products/StepperMotors/42BYGHW%20Series.pdf abgerufen

PTM Mechatronics. (22. 03 2021). Von https://ptm-mechatronics.com/themen-2/grundlagen-guide/radialkolbenmotor/ abgerufen

Reichelt Chemietechnik GmbH + Co. . (25. 04 2021). Von https://www.rct-online.de/magazin/was-bedeutet-fda-konform/ abgerufen

ReprapWorld. (10. 06 2021). Von https://reprapworld.com/datasheets/datasheet%20drv8825.pdf abgerufen

SKF. (10. 06 2021). Von https://www.skf.com/at/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-6001-2RSL abgerufen

SKF. (10. 06 2021). Von https://www.skf.com/at/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-W%2061806-2RS1 abgerufen

Swissfil. (13. 05 2021). Von https://www.swissfil.ch/wp-content/uploads/2019/05/TDS_SWISSFIL_PLA_DE_V1.2.pdf abgerufen

Syco Tec. (22. 03 2021). Von https://info.sycotec.eu/elektromotoren-arten/ abgerufen

Ventile 24. (24. 05 2021). Von https://media.ventile24.de//catalog/product/documents/8396_pim.pdf abgerufen