



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Marlene Caroline Sophie Bartschies

Entwicklung eines adaptiven Prüfstands für die Solarpanelreinigung

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

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

Marlene Caroline Sophie Bartschies
Entwicklung eines adaptiven Prüfstands
für die Solarpanelreinigung

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

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

Erstprüfer/in: Prof. Dr. Anna Kerstin Usbeck
Zweitprüfer/in: Dipl. Ing. Niels Eiben

Abgabedatum: 04.03.2024

Zusammenfassung

Marlene Caroline Sophie Bartschies

Thema der Bachelorthesis

Entwicklung eines adaptiven Prüfstands für die Solarpanelreinigung

Stichworte

Prüfstand, Solarpanelreinigung, Wüstenstaub, Trockenreinigung, Reinigungsmodul

Kurzzusammenfassung

Ziel dieser Bachelorarbeit ist die Entwicklung und Konstruktion eines Reinigungsmoduls für einen Prüfstand, der speziell auf die Herausforderungen der Solarreinigung in trockenen und staubigen Regionen ausgerichtet ist. Der Fokus liegt dabei auf der Trockenreinigung mittels Bürsten. Die Randbedingungen wurden untersucht und Methoden der Produktentwicklung eingesetzt, um eine Lösung zu entwickeln. Nach dem Bau des Prototyps wurden Tests zur Validierung der Funktionalität durchgeführt. Mit Hilfe des Reinigungsmoduls, genannt DUSTe, ist es möglich, verschiedene Parameter zu testen und somit optimale Reinigungsstrategien für die Staubentfernung von Solarmodulen zu identifizieren.

Marlene Caroline Sophie Bartschies

Title of thesis

Development of an adaptable test bench for solar panel cleaning

Keywords

Test bench, solar panel cleaning, desert dust, dry cleaning, cleaning module

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to develop and construct the cleaning module of a test bench to meet the challenges of solar panel cleaning in arid and dusty regions. Therefore, the prerequisite of using dry brush cleaning methods was defined. To this end, research and methodologies were used to conceptualize, design and develop a solution that was subsequently named DUSTe. Once a prototype was built, tests were conducted to validate its functionality. By using DUSTe, it is possible to test a variety of parameters and identify optimal cleaning strategies to remove dust from solar panels.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	III
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Motivation	1
1.2 Zielsetzung	2
2 Stand der Technik.....	3
2.1 Solarmodule	3
2.2 Verschmutzungen.....	3
2.3 Solarpanelreinigung.....	4
2.4 Messen des Verschmutzungsgrades	5
2.5 Prüfstände	6
3 Konzeptentwicklung	7
3.1 Vergleichsanalyse.....	8
3.2 Anforderungsanalyse	9
3.3 Funktionsanalyse.....	11
3.4 Morphologischer Kasten	12
3.4.1 Konzept 1	13
3.4.2 Konzept 2	14
3.4.3 Konzept 3	15
3.4.4 Konzept 4	16
3.5 Gewichtete Punktbewertung	16
3.6 Risikoanalyse	17
3.7 Versuchsplanung	19
4 Berechnung und Konstruktion	20
4.1 Rahmen.....	20
4.1.1 Höhenverstellung.....	22
4.1.2 Führung in Z	22
4.1.3 Räder	23
4.2 Bürstenschlitten	24
4.2.1 Seitenbleche.....	25
4.3 Antrieb	26
4.3.1 Motorleistung.....	26
4.3.2 Wellen	27
4.3.3 Welle-Nabe-Verbindung	29
4.3.4 Zahnriemen	30
4.3.5 Lagerung	31
4.4 Bürsten	31
4.5 Bürstenadapter	32

4.6	Bürstensetups.....	33
5	Fertigung und Montage	35
5.1	Metallbauteile	35
5.2	Kunststoffbauteile	36
5.3	Durchgeführte Optimierungen.....	36
5.4	Montage	37
6	Tests und Validierung	38
6.1	Funktionstests	38
6.1.1	Kleine Bürste mögliche Kollision mit PV.....	39
6.1.2	Wechsel des Bürstenmaterials	39
6.1.3	Kollision Riemenscheibe mit Rahmen.....	40
6.1.4	Winkelverschiebung der Stehlager	40
6.1.5	Drehmomentübertragung kleine Bürste	41
6.1.6	Kollision Riemenspannradschraube.....	41
6.2	Validierung	42
6.3	Empfohlene Optimierungen	43
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	44
7.1	Zusammenfassung	44
7.2	Ausblick	45
	Literaturverzeichnis.....	46
A	Vergleichsübersicht Solarreiniger.....	49
B	Anforderungsliste.....	51
C	Setup Tellerbürste	53
D	FMEA	54
E	Berechnung.....	57
F	Stückliste.....	61
G	Zeichnungen	63
H	Fotodokumentation	71

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1 Fotos des Solarparks in Diass, saubere und verstaubte Solarmodulen, Traktor mit Reinigungsbürste	1
Abbildung 1.2 Solarpanelreinigung im Solarpark Diamniadio mit Textilstücken	2
Abbildung 2.1 Staubprobe Diass 2023, x40 Vergrößerung, Fokus kleine und große Partikel ..	4
Abbildung 2.2 geführter Solarreiniger links und mobiler Solarreiniger rechts [21].....	5
Abbildung 2.3 Prüfstand zur Untersuchung trocken gereinigter Solarmodule [1].....	6
Abbildung 3.1 CAD-Darstellung des Prüfstandes exemplarisch mit Portalrahmen und Reinigungsmodul	7
Abbildung 3.2 Funktionsstruktur des Gesamtsystems.....	11
Abbildung 3.3 Morphologischer Kasten mit 4 Konzepten	12
Abbildung 3.4 Konzept 1 Reinigungsmodul.....	13
Abbildung 3.5 Konzept 2 Reinigungsmodul.....	14
Abbildung 3.6 Konzept 3 Reinigungsmodul.....	15
Abbildung 3.7 Konzept 4 Reinigungsmodul.....	16
Abbildung 3.8 GUI erstellt von Team Software, mit Einstell- und Ausfüllmöglichkeiten	19
Abbildung 4.1 Einteilung der Konstruktion in Baugruppen und Unterbaugruppen	20
Abbildung 4.2 CAD-Darstellung des Rahmens mit Unterbaugruppen und Zoomansichten ..	21
Abbildung 4.3 CAD-Darstellung, Höhenverstellung in Z	22
Abbildung 4.4 CAD-Darstellung Z-Führung, Sitz im Portalrahmen	22
Abbildung 4.5 CAD-Darstellung der Räder, Radhalterung, Freiheitsgrade, X-Anordnung	23
Abbildung 4.6 CAD-Darstellung, Bürstenschlittenlinks und Winkelverstellung des Bürstenschlittens rechts.....	24
Abbildung 4.7 CAD-Darstellung Seitenblech, mittiges Seitenblech	25
Abbildung 4.8 CAD-Darstellung, Bürstensetup 1 und 2, Position der Riemen	26
Abbildung 4.9 CAD-Darstellung Wellenstümpfe	27
Abbildung 4.10 Freikörperbild Bürstenwelle	28
Abbildung 4.11 mittlere Flächenpressung Passfeder [36].....	29
Abbildung 4.12 CAD-Darstellung, Position der Riemenscheiben und Riemen 1-3	30
Abbildung 4.13 CAD-Darstellung, Bürsten im Schnitt mit Lagerung und Wellen.....	31
Abbildung 4.14 CAD-Darstellung der Bürstenadapter der großen und kleinen Bürste, Foto der Staubsaugerroboterbürste Roborock [15]	32
Abbildung 4.15 CAD-Darstellung, Setup mittlere Bürsten	33
Abbildung 4.16 CAD-Darstellung, Setup kleine Bürsten.....	34
Abbildung 4.17 CAD-Darstellung, Setup große Bürste.....	34
Abbildung 5.1 gefertigte Metallbauteile	35
Abbildung 5.2 Kunststoffbauteile.....	36
Abbildung 5.3 Positionierung des Winkelanschlages und der Winkelverbinder	37
Abbildung 6.1 DUSTe mit eingespannten Roboterstaubsaugerbürsten und kleiner Lücke zum Solarpanel	39
Abbildung 6.2 CAD-Darstellung Bürstenleistsitz in Rundprofilnut.....	39
Abbildung 6.3 CAD-Darstellung, Kollision Riemen und Riemenscheibe mit Rahmen	40
Abbildung 6.4 Skizze des Stehlagers SS KFL001 mit Winkelverzug, in Anlehnung an [27]..	40
Abbildung 6.5 CAD-Darstellung, Kollision Riemenspannradschraube	41
Abbildung 6.6 CAD-Darstellung der auszutauschenden Wellen und Lager, Flanschlager F608 2RS 8 x 22 x 7 [23]	43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1 Vergleichsübersicht Solarreiniger, SolarCleanso B1 [21], PVCleaner Robot V1.0 [3], Dry Patroller [24], Telescope Patroller [24], SolarCleanso F1 / M1 [21], Ecoppia E4 [22]	8
Tabelle 3.2 Anforderungsliste DUSTe	9
Tabelle 3.3 Gewichtete Punktebewertung der Konzepte 1-4	17
Tabelle 3.4 Ausschnitt der FMEA	18
Tabelle 4.1 Ausschnitt der Stückliste, Rahmenbauteile	21
Tabelle 4.2 Ausschnitt Stückliste, Bauteile des Bürstenschlittens	24
Tabelle 4.3 Bürstendurchmesser der Bürstensetups	33
Tabelle 6.1 Funktionstests	38
Tabelle 6.2 Anforderungsliste DUSTe mit Validierung	42
Tabelle 6.3 empfohlene Optimierungen	43

Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer Aided Design
DUSTe	Dynamic Utility for Solar Technology Efficiency
FDM	Fused Deposition Modeling
GUI	graphical user interface
HAW	Hochschule für Angewandte Wissenschaften
MDesign	Mechatronisches Design
PI Berlin	Photovoltaik-Institut Berlin
PV	Photovoltaik
SLS	Selective Laser Sintering

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Die Nutzung von Solarenergie als nachhaltige Energiequelle gewinnt weltweit an Bedeutung, insbesondere in Regionen mit hoher Sonneneinstrahlung wie Afrika, wo das Solarpotenzial enorm ist. In Wüstenregionen wie dem Senegal stellt der Saharastaub ein Problem dar, da er sich leicht auf den Solarmodulen ablagert. Bereits ein Gramm Staub auf einem Quadratmeter Solarmodul kann die Leistung um bis zu 40 Prozent reduzieren, was in manchen Regionen eine fast tägliche Reinigung erfordert [10].

Unweit von Dakar im Senegal befindet sich der Solarpark „Centrale Solaire de Diass“, der sich über 32 Hektar erstreckt und aus 85,248 Solarmodulen besteht [33]. Derzeit werden die Solarmodule mit einem Traktor gereinigt, an dem eine 6 m lange Bürste befestigt ist (siehe Abbildung 1.1 unten rechts). Dazu wird entmineralisiertes Wasser verwendet, das über mehrere Kilometer transportiert wird.



Abbildung 1.1 Fotos des Solarparks in Diass, saubere und verstaubte Solarmodulen, Traktor mit Reinigungsbürste

Die Reinigung erfolgt einmal im Monat, denn so lange dauert es, bis die gesamte Fläche gereinigt ist und wieder von vorne begonnen wird. Oben links in Abbildung 1.1 sind die mit Staubschlieren bedeckten Solarmodule zu sehen, selbst das Abwischen mit einem trockenen Tuch entfernt den sehr feinen Staub nicht vollständig.

Die Reinigung mit dem Traktor erfolgt derzeit mit fossilen Brennstoffen, was im Widerspruch zur nachhaltigen Energiegewinnung eines Solarparks steht. Zudem ist Wasser ein kostbares Gut in Wüstenregionen, das besser als Trinkwasser oder für landwirtschaftliche Zwecke genutzt werden sollte.

Ein weiteres Beispiel für die Reinigung von Solarmodulen im Senegal ist in Abbildung 1.2 dargestellt. Im Solarpark Diamniadio werden die Solarmodule von Hand mit einem Band aus zusammengebundenen Textilstücken gereinigt, was nicht nur sehr zeitaufwendig ist, sondern auch eine hohe körperliche Belastung für die Arbeiter darstellt.



Abbildung 1.2 Solarpanelreinigung im Solarpark Diamniadio mit Textilstücken

Es ist daher notwendig, effiziente und nachhaltige, aber auch kostengünstige Reinigungstechnologien zu entwickeln, die ohne den Einsatz von Wasser auskommen.

1.2 Zielsetzung

Um verschiedene Reinigungstechnologien systematisch untersuchen zu können, soll ein Prüfstand für die Reinigung von Solarmodulen entwickelt werden. Dieser Prüfstand soll es ermöglichen, optimale und nachhaltige Reinigungsparameter zu identifizieren.

Der Fokus liegt dabei auf der Erprobung verschiedener Bürstenformen und Borstenmaterialien für die Trockenreinigung sowie auf Reinigungsparametern wie der Bürstendrehzahl und der Verfahrensgeschwindigkeit.

Der Aufbau des Prüfstandes soll es ermöglichen, verschiedene Reinigungsverfahren zu testen, um diese miteinander vergleichen zu können. Darüber hinaus soll er konstruktiv leicht modifizierbar sein.

Zur Verifizierung der Versuchsergebnisse soll eine Strategie zur Bewertung der Reinigungsergebnisse entwickelt werden, so dass nach Abschluss der Versuchsreihen am Versuchsstandort Hamburg die Ergebnisse unter realen Bedingungen im Senegal verifiziert werden können.

2 Stand der Technik

Für die Entwicklung eines Prüfstandes zur Reinigung von Solarmodulen werden verschiedene miteinander zusammenhängende Themen untersucht. Diese bilden Randbedingungen und Grundlagen für die Entwicklung des Prüfstandes.

2.1 Solarmodule

Es gibt verschiedene Arten von Solarmodulen, sie lassen sich in monokristallin, polykristallin und Dünnschichtmodule unterteilen. Sie unterscheiden sich in ihrem Aufbau, den Herstellungskosten und ihrer Effizienz [11], allerdings ist für alle gleich, dass sie Sonnenlicht zum Generieren von Energie benötigen, welches über ihre Oberfläche absorbiert wird.

Der Wirkungsgrad von Solarmodulen liegt zwischen 10 und 25 Prozent wobei durch hohe Temperaturen, Verschmutzungen und Abnutzung wird dieser reduziert wird [2].

Die auf dem Solarfeld in Diass eingesetzten Solarmodule sind die Q.Power G5 270 [14] vom Hersteller Hanwha Q Cells, laut Datenblatt liegt die maximale Leistung bei 270 W pro Modul. Die Dimensionen sind 1,650×0,991 m, mit einer 3,2 mm dicken Glasscheibe.

2.2 Verschmutzungen

Für die Entwicklung eines Prüfstandes für Solarpanelreinigung muss die Hauptursache, weshalb gereinigt oder wovon gereinigt werden soll, betrachtet werden. Je nach Region treten unterschiedliche Verschmutzungsmedien auf. Auch ist die Reinigung nicht überall gleichregelmäßig notwendig, was vom Klima und anderen Umweltfaktoren abhängig ist. Der Anstellwinkel und die Ausrichtung des Solarpanels können bereits weniger Verschmutzungen bewirken.

Im folgenden Abschnitt wird die Verschmutzung durch Staub genauer betrachtet. Weitere potenzielle Verschmutzungsquellen sind beispielsweise Vogelkot, Algen, Flechten, Moos, Blätter, Ruß und diese werden nicht weiter diskutiert.

Sedimente, die durch Wind transportiert werden können, haben eine Korngröße, die kleiner als 70 µm ist [29]. Sedimente lassen sich nach DIN ISO 14688-1, entsprechend ihrer Größe kategorisieren. Partikel, die kleiner als 70 µm sind, besteht somit aus Feinsand (63 µm bis 200 µm), Schluff (2 µm bis 63 µm) und Ton (< 2 µm) [6]. Staub haftet durch die Wechselwirkung zwischen Ton und Glas an den Photovoltaik-Modulen (PV) [9]. Ein weiterer Einflussfaktor kann die Wasserkondensation über Nacht an den PV-Modulen darstellen. Während eines Aufenthaltes im Senegal konnte festgestellt werden, dass die PV-Module auf dem Solarfeld in Diass früh am Morgen feucht sind, auch wenn es keinen Niederschlag gegeben hat.

Bei den Staubablagerungen handelt es sich um Flugsand aus der Sahara, der durch Wind auf die PV-Module transportiert wird. Flugsand hat eine besonders kleine Korngröße. Die Kornform von Flugsanden wie auch von Wüstensand ist durch den Lufttransport gerundet [31]. Rundsande besitzen weniger Schleifwirkung und stellen dadurch eine geringere Belastung von Oberflächen dar [16].

Beim Aufenthalt in Senegal im November/Dezember 2023 wurde vom Solarfeld in Diass eine Probe der Sedimentverschmutzung der Solarpanels genommen. Die Probe wurde von acht Solarpanels mittels Textillappen von Hand und durch Ausschütteln in eine Plastiktüte gesammelt. Die Untersuchung der Probe erfolgt auf einem Olympus BX51 Mikroskop mit einer Vergrößerung von x40 in der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW). Um die Korngröße zu bestimmen, wird die kleinste Höhe eines Partikels gemessen, der sogenannte Äquivalentdurchmesser. Dieser Durchmesser entspricht der Seitenlänge eines Sieblochs, durch das eine Kugel mit dem gleichen Durchmesser hindurchpasst [19].

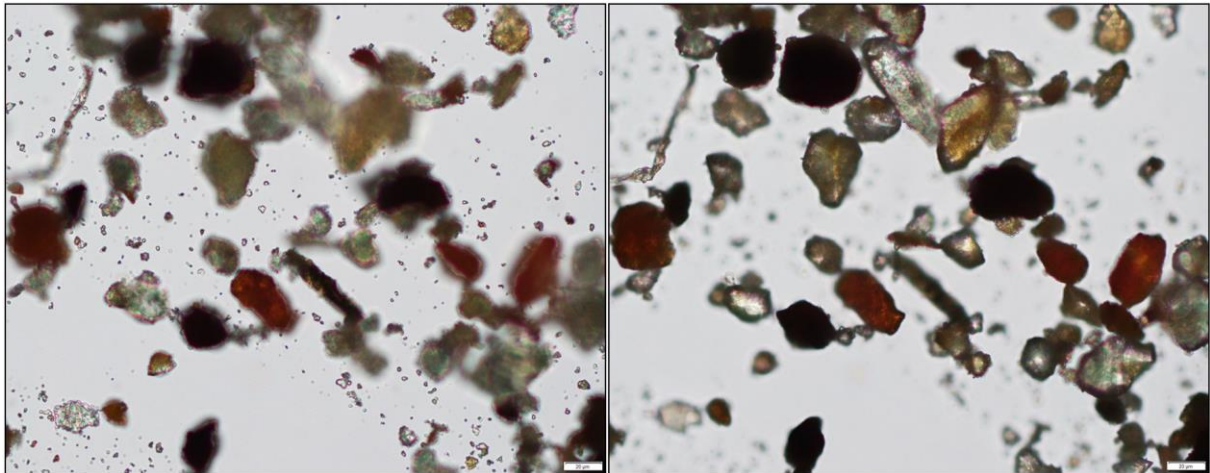


Abbildung 2.1 Staubprobe Diass 2023, x40 Vergrößerung, Fokus kleine und große Partikel

Es werden Messungen an sechs verschiedenen Positionen der Probe durchgeführt, der Äquivalentdurchmesser der Körner liegt zwischen $63\text{ }\mu\text{m}$ und $0,8\text{ }\mu\text{m}$, siehe Abbildung 2.1, wodurch die Probe als Schluff mit Tonanteilen und abgerundeter Form beschrieben werden [6].

Für die Wahl eines Vergleichssandes sollte auf die richtige Korngröße und Kornform geachtet werden, um vergleichbare Ergebnisse in Hinsicht auf Verschleiß der Bürsten sowie der Photovoltaik-Module zu erzielen. Außerdem sollten ähnlich adhäsive Effekte des Staubes mit dem Solarmodul simuliert werden, dies kann durch eine Emulsion des Teststaubes mit Wasser oder Methanol erreicht werden [1]. Auch das Fließverhalten des Staubes kann bei der Reinigung eine Rolle spielen.

2.3 Solarpanelreinigung

Es gibt verschiedene Geräte zur Reinigung von Solarmodulen, die je nach Einsatzmöglichkeit für Solarfelder an Land oder auf dem Wasser oder private Anlagen wie z. B. Dächer geeignet sind. Einige der größeren Geräte können mit einer bis zu sechs Meter langen Bürste eine ganze Reihe von Solarmodulen reinigen [21]. Es gibt auch kleine wendige Roboter, die leicht zu transportieren sind und z. B. auf Dächern eingesetzt werden können [17]. Manche der Reiniger sind für die manuelle Reinigung geeignet, und für diese Zwecke z. B. mit einer rotierenden Bürste und einem Teleskoparm ausgestattet [24], andere sind hoch automatisiert, sodass sie ihre Reinigungszyklen selbstständig durchfahren können und dabei Daten sammeln [18]. Viele dieser Geräte reinigen mit Bürsten sowohl nass als auch trocken. Dabei

können die Reiniger mit Bürsten in zwei Kategorien eingeteilt werden, rahmengeführte und frei auf dem Solarpanel bewegliche Geräte, siehe Abbildung 2.2.



Abbildung 2.2 geführter Solarreiniger links und mobiler Solarreiniger rechts [21]

Es gibt auch Ansätze, bei denen mit einem erzeugten Luftstrom [22] oder mit Wasserberieselung [28] gereinigt wird. In Veröffentlichungen wird auch beschrieben, wie Vibrationen [13] zur Reinigung eingesetzt werden und wie Wassertropfen durch Vibrationen über die Oberfläche geleitet werden und dabei Staub mitschleppen [4].

2.4 Messen des Verschmutzungsgrades

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, den Verschmutzungsgrad eines Solarmoduls zu bestimmen. Die einfachste und direkteste Methode ist die Messung der Spannung, die von einer Lichtquelle im Solarmodul erzeugt wird, wobei der Wert im verschmutzten Zustand mit dem Wert im sauberen Zustand verglichen wird. [30].

Eine weitere Möglichkeit ist die indirekte Messung durch Lichtreflexion, sowie RGB-Farbmessung. Das Messgerät ist ausgestattet mit einer integrierten Solarzelle, einer Lichtquelle und einem Farbsensor und kann den Verschmutzungsgrad über den Wert der Spannungsänderung der Solarzelle sowie dem Farbwert, der mehr oder weniger von der Farbe des Solarpanels abweicht, bestimmen. Ein verschmutztes Solarpanel reflektiert mehr Licht als ein sauberes, denn dieses absorbiert das Licht und generiert dadurch Strom. Durch Vergleichsmessungen und der Kalibrierung zur jeweiligen Verschmutzung kann somit eine Aussage zum Verschmutzungsgrad des Solarpanels getroffen werden. Dieses Verfahren stammt aus der Abschlussarbeit von Rayan Hamo und soll für die Einschätzung der Reinigungsleistung des Prüfstandes eingesetzt werden [7].

Mit einem Glanzmeter kann Verschmutzung über die Änderung der Reflexion des Lichtes gemessen werden, das von einer Oberfläche reflektiert wird [25]. Somit könnte eine Einschätzung getroffen werden, wie weit diese von Vergleichswerten abweicht (sauberes Solarpanel, zu Verschmutzung mit bestimmter Menge von Staub pro Quadratmeter).

Je nach Aufbau des Prüfstandes kann der übrig gebliebene Staub aufgesammelt, gewogen und mit der aufgetragenen Menge verglichen werden. Besonders bei leichten und feinen Partikeln des Verschmutzungsmediums ist diese Messung allerdings fehleranfällig, da Staub im Lappen oder der Bürste hängen bleibt und die Auflösung einer Waage ohne Einhausung nicht genau genug sein wird.

Durch visuelle Beurteilung der Testfläche, wie durch Vergleich von Fotos vor und nach der Reinigung, kann ebenfalls eine Aussage über die Reinigungsleistung geben.

2.5 Prüfstände

In „Solar Energy“ gab es 2017 eine Veröffentlichung zu einem Prüfstand in Saudi-Arabien zur Untersuchung der Auswirkungen von trocken gereinigten Solarmodulen mittels Bürste. Der Aufbau mit Einhausung, Bürste und einer Prüffläche für ein Solarmodul mit den Abmessungen von 10×7 in (etwa 25×18 cm) ist in Abbildung 2.3 zu sehen.

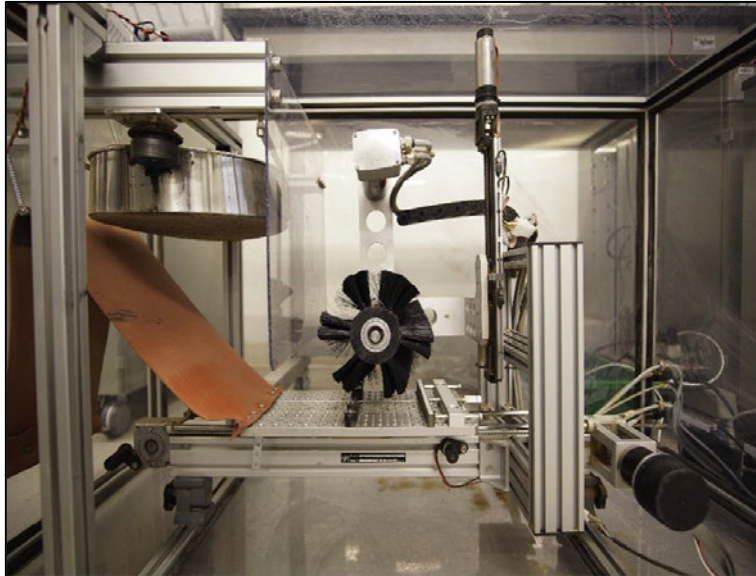


Abbildung 2.3 Prüfstand zur Untersuchung trocken gereinigter Solarmodule [1]

Die Höhe der Bürste sowie ihre Drehzahl und Geschwindigkeit zum Solarmodul sollen einstellbar sein. Die Verschmutzung wird als Emulsion aus Staub und Methanol auf das Solarpanel aufgebracht, um das Anhaften nachzubilden. Zur Beurteilung der Reinigungsleistung werden die Transmissionsspektren mit einem Spektralfotometer gemessen. Der Einfluss der Reinigung wird mikroskopisch verglichen. Aus den Ergebnissen kann entnommen werden, dass Gummibürsten die besten Reinigungsleistungen erzielen und dabei auch die geringste Beschädigung der Oberfläche bewirken [1].

Dieser Prüfaufbau lässt dennoch viele Faktoren der Reinigung offen, denn es wird nicht genauer betrachtet unter welchen Parametern die besten Reinigungsergebnisse erzielt werden (z. B. Drehzahl und Geschwindigkeit) und wie viel Energie dafür aufgewandt werden muss, um ein sauberes Solarpanel zu erhalten.

3 Konzeptentwicklung

Zur Entwicklung des Reinigungsmoduls des Prüfstandes werden verschiedene gängige Methoden der Produktentwicklung, sowie dem V-Modell aus der VDI/VDE 2206 angewandt [35]. In diesem Kapitel wird auf die Konzeptentwicklung eingegangen, dabei wird die verwendete Methode kurz beschrieben.

Einzelne Randbedingungen stehen bereits fest, so soll der Prüfstand rahmengeführt sein und die Trockenreinigung mittel Bürsten abbilden. Der Portalrahmen wird parallel durch Studierende des Kurses Mechatronisches Design (MDesign) entwickelt. In Abbildung 3.1 ist exemplarisch ein Portalrahmen abgebildet, in dem das Reinigungsmodul als grüne Box dargestellt ist.

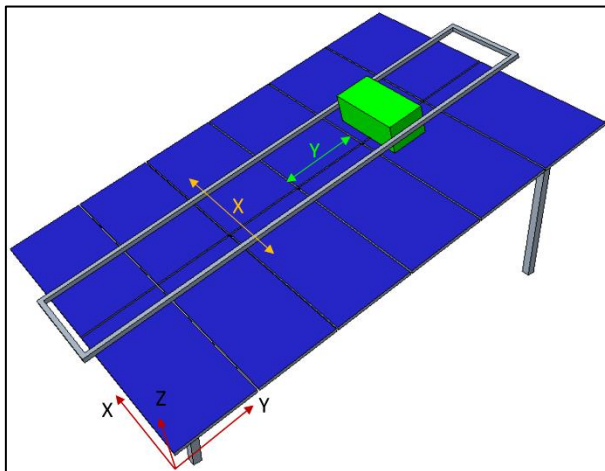


Abbildung 3.1 CAD-Darstellung des Prüfstandes exemplarisch mit Portalrahmen und Reinigungsmodul

Das Bewegungskonzept wird durch die farbigen Pfeile mittig dargestellt. Das Reinigungsmodul soll im Rahmen in Y-Richtung beweglich sein, während beides zusammen durch den Rahmen in X-Richtung bewegt werden kann. Die Z-Achse verläuft dabei senkrecht zum Solarpanel.

3.1 Vergleichsanalyse

Um einen Überblick über bereits vorhandene Lösungsansätze zur Reinigung von PV-Modulen zu erhalten, werden Solarreiniger mit Bürsten recherchiert und miteinander verglichen. Dabei werden Eigenschaften wie die Art, Anordnung, Anzahl und Ausrichtung der Bürsten sowie Bürstendurchmesser, Drehzahlen und Verfahrensgeschwindigkeiten betrachtet. Die Ergebnisse können auch als Grundlage zur Einschätzung, beispielsweise für die Berechnung der Motokennwerte, verwendet werden. Die erste Seite der Vergleichsübersicht ist in Tabelle 3.1 dargestellt, die gesamte Übersicht ist im Anhang A zu finden.

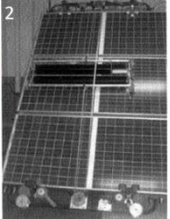
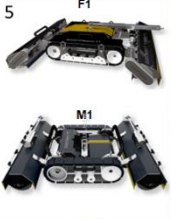
						
Name	B1	PVCleaner Robot V1.0	Dry Patroller	Telescope Patroller	F1 / M1	Ecoppia E4
Hersteller	SolarCleano	/	GEVA-BOT	GEVA-BOT	SolarCleano	Ecoppia
Jahr	/	2009	/	/	/	/
Land	Luxembourg	USA / Türkei	israel, Verkauf Weltweit	israel, Verkauf Weltweit	Luxembourg	israel, Indien, Chile
Art der Reinigung	mechanisch automatisiert trocken und nass (7-12 L/min)	mechanisch automatisiert Nassreinigung (0,58l/m²)	mechanisch automatisiert, trocken und nass (1l/PV-Modul)	mechanisch von Hand mit Wasser (1l/Panel)	mechanisch automatisiert trocken und nass	mechanisch automatisiert erzeugt Windstrom
Bürstendurchmesser	380mm	geschätzt 120mm	294mm	180mm	170mm	/
Anzahl und Bürstenart	1 Walzenbürste helikoidal	2 Walzenbürsten	1 Walzenbürste	1 Walzenbürste	2 Walzenbürsten helikoidal Gummilippen vor der Bürste	2 Walzenbürsten
Bürsten- material	/	Nylon 0,15mm Haardurchmesser	"Durable, UV protected unique brush"	"Durable, UV protected unique brush"	/	weiche Microfaser Elemente
Verschmutzungen	/	Staub, Erde Sägespäne Schlamm (trocken/nass)	alle Arten von Verschmutzungen	alle Arten von Verschmutzungen	/	Staub
Rotations- geschwindigkeit	120 tr/min	in Abhängigkeit zur Verfahrgeschwindigkeit	180 Umdrehungen/min	333 Umdrehungen/min	/	/
Verfahrgeschwindigkeit	40m/min (0,66m/s)	2,33m/min	30m/min (0,33 m/s)	Handbedienung	F1: 40m/min (0,66m/s) M1 30 m/min (0,5 m/s)	/
Gewicht	/	zwischen 30 und 40kg	12,5-27kg (1-5m Bürste)	4 kg	F1: 80kg / M1: 37kg	/
Energieverbrauch	/	/	/	105 W	F1: 490W / M1: 140W	/
Besonderheiten Kommentar	geringe Gewichtsbelastung auf Solarpanelen, Abstützung am Boden Winkelanpassung der	Portalrahmenähnlich, 2 Laufkatzen oben und unten entlang der Solarpanelkante	/	/	Fährt automatisiert, ist an Wasserversorgung angeschlossen	Bürste berührt nicht! Luftstrom sorgt für Abtransport des Staubes Reinigt beim Abwärtsfahren PI-Berlin, viele PV Hersteller
Zertifizierung	/	/	PI-Berlin	PI-Berlin	/	/

Tabelle 3.1 Vergleichsübersicht Solarreiniger, SolarCleano B1 [21], PVCleaner Robot V1.0 [3], Dry Patroller [24], Telescope Patroller [24], SolarCleano F1 / M1 [21], Ecoppia E4 [22]

Vier der abgebildeten Systeme sind über einen Rahmen oder über die Außenkanten des Solarmoduls geführt (1, 2, 3 und 6), drei davon sind mobil (4 und 5), wobei Nummer 4 manuell bedient wird. Es ist festzustellen, dass alle Solarreiniger, die mit Bürsten reinigen, Walzenbürsten verwenden und dass die meisten Solarreiniger mit ein bis zwei Bürsten ausgestattet sind. Dabei liegt der Bürstendurchmesser zwischen 90 mm und 300 mm. Zehn der insgesamt 13 verglichenen Solarreiniger sind für die Nassreinigung ausgelegt, die Trockenreinigung sollte allerdings nach Herstellerangaben mit jedem der Produkte möglich sein. Die Solarreiniger der Hersteller Ecoppia und GEVA-Bot wurde durch das Photovoltaik-Institut Berlin (PI Berlin) zertifiziert, wobei keine Informationen der durchgeführten Tests gefunden werden konnten.

3.2 Anforderungsanalyse

Basierend auf den Ergebnissen der Marktanalyse wird eine Anforderungsliste erstellt. Das Reinigungsprinzip soll Walzenbürsten beinhalten. In Tabelle 3.2 sind die für die Entwicklung des Reinigungsmoduls (DUSTe, Dynamic Utility for Solar Technology Efficiency) festgelegten Anforderungen aufgeführt. Die vollständige Liste des Prüfstandes ist in Anhang B „Anforderungsliste“ zu finden, in der auch die Versuchsparameter aufgeführt sind.

Nr.	Anforderung	Zahlenwert / Ausprägung	Forderung / Wunsch
1.	Einsatzort / Umgebung / Klima		
1.1	Senegal, Solarfeld Diass	6 m × 60 m	W
1.2	Deutschland, HAW Hamburg	5,14 m × 2 m	F
1.3	Windstärken zwischen	15 bis 30 km/h	W
1.4	Temperatur	10° bis 50° C	F
1.5	UV-Beständig	UV-Index 7 im Senegal	F
1.6	Luftfeuchtigkeit	bis 90 %	F
2.	Funktionen		
2.1	Höhenverstellung Bürste	In Z-Richtung	F
2.2	Trockenreinigung	mittels Bürste	F
2.3	Ausrichtung der Bürsten	normal zum PV	W
2.4	Winkelverstellung der Bürste	In XY-Ebene	W
2.5	Auffangen des Staubes		W
3.	Technische Merkmale		
3.1	Breite Reinigungsmodul	zwischen 500 und 1000 mm	F
3.2	Bürstenanzahl	2, unabhängig einsetzbar	F
3.3	Bürstendurchmesser	40 bis 300 mm	F
3.4	Gewicht	< 50 kg	F
4.	Leistung der Bürsten		
4.1	Drehzahl	0 bis 500 u/min	F
4.2	Leistung des Bürstenmotors	etwa 50 W	F
5.	Materialien		
5.1	korrosionsbeständig		F
5.2	leichte Materialien		W
6.	Kosten		
6.1	Gesamtkosten	1.000 €	F
7.	Fertigung und Montage		
7.1	Montier- und Demontierbarkeit	mit Standardwerkzeugen	F
7.2	Wechsel der Bürsten	Einfach, wenige Handgriffe	F
7.3	Ändern von Parametern	in wenigen Schritten	W
8.	Einsatz und Instandhaltung		
8.1	Wartungsfreundlich	zugänglich, geringer Aufwand	W
8.2	Ersatzteile	Verfügbarkeit, einfach Fertigung	W
8.3	Widerholgenauigkeit	Störgrößen minimieren	F

Tabelle 3.2 Anforderungsliste DUSTe

Der Einsatzort ist der Laborraum der HAW Hamburg mit sechs Solarmodulen, die jeweils eine Größe von 1 × 1,7 m haben. Zur Validierung der Ergebnisse soll der Prüfstand auch in Diass

auf dem Solarfeld einsetzbar sein. Dies erfordert unterschiedliche Anforderungen, sodass zunächst die Anforderungen an den Laborraum gelten und soweit möglich auch die Anforderungen an das Klima im Senegal.

Eine Höhenverstellung der Bürsten ist vorzusehen, um Bürsten mit unterschiedlichen Durchmessern testen und die Kontaktfläche zum Solarpanel einstellen zu können. So kann der Einfluss der Bürstenhöhe auf das Reinigungsbild und den Energieverbrauch untersucht werden. Durch die Winkelverstellbarkeit der Bürsten kann der Einfluss der Ausrichtung zur Kante des Solarmoduls berücksichtigt werden. Bei vielen Reinigungsbürsten von Solarreinigern ist auffällig, dass die Borsten spiralförmig oder in Winkeln um den Bürstenkern angeordnet sind, der daraus resultierende Effekt auf die Reinigung kann durch die Winkelverstellung allerdings nur eingeschränkt untersucht werden.

Die Anzahl der Reinigungsbürsten wurde auf zwei festgelegt, um den Effekt von mehreren im Eingriff befindlichen Bürsten untersuchen zu können. Die meisten Solarreiniger sind mit zwei Bürsten ausgestattet, wobei bei den erhältlichen Solarreinigern unklar ist, ob die Bürsten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten betrieben werden. In der Bachelorarbeit von M. Randow [30] wird die Reinigung mit zwei unterschiedlich schnellen Bürsten behandelt, sodass eine genauere Untersuchung mit weiteren Variablen sinnvoll erscheint.

Wichtige Anforderungen an das Reinigungsmodul sind die einfache und schnelle Anpassbarkeit der Bürsten, d. h. der Austausch des Reinigungsmaterials sowie die Einstellung der Bürstenhöhe. Wichtig ist auch, dass alle vorgenommenen Einstellungen messbar sind.

Die geprüften Lasten für die Solarmodule in Diass können aus dem Datenblatt entnommen werden. Der Druck von 5400 Pa entspricht der Schneelast und 4000 Pa der Windlast [14]. Auf die Fläche eines Solarmoduls verteilt entspricht dies einem Gewicht von 900 kg bzw. 666 kg.

Die Belastung durch den Prüfstand kann nicht mit dem gleichen Gewicht angenommen werden, da durch die Abstützung der Räder eine Linien- bzw. Punktbelastung vorliegt. Daher wird ein Maximalgewicht von 50 kg festgelegt, außerdem soll bei der Konstruktion auf Gewichtseinsparung geachtet werden.

Wichtig für einen Prüfstand ist, dass verschiedene Parameter mit hoher Wiederholgenauigkeit verglichen werden können. Bei der Konzeptentwicklung sowie bei der Auswahl der Komponenten wird darauf geachtet, dass Störgrößen so gering wie möglich gehalten werden.

3.3 Funktionsanalyse

Abbildung 3.2 zeigt die funktionale Struktur des Gesamtsystems, die sich aus den Anforderungen der Prüfstandentwicklung, den gegebenen Rahmenbedingungen, wie z. B. den zur Verfügung stehenden Solarmodulen und der Unterstützung durch die Studierenden der Lehrveranstaltung MDesign ergibt.

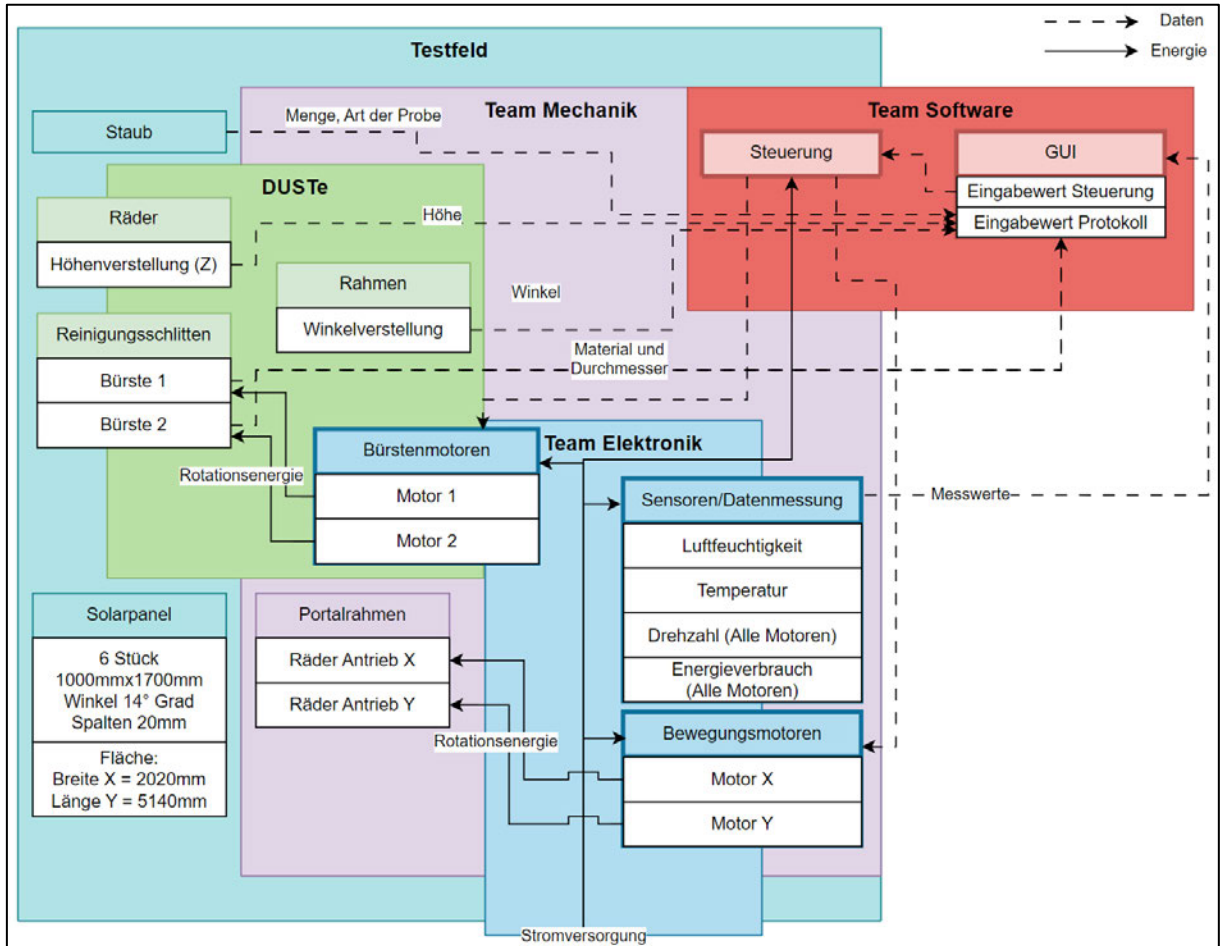


Abbildung 3.2 Funktionsstruktur des Gesamtsystems

Die Verantwortungsbereiche sind farblich abgegrenzt außerdem sind die Schnittstellen zu den anderen Teams und die räumliche Lage der Komponenten dargestellt. Das Gesamtsystem wird auf dem Testfeld aufgebaut, das aus sechs Solarmodulen besteht. Der Portalrahmen, der vom Team Mechanik entwickelt wird, soll alle Sensoren aufnehmen und die Bewegung des Reinigungsmoduls DUSTe in X- und Y-Richtung ermöglichen. Die Steuerung der Motoren erfolgt durch das Software-Team, das eine grafische Benutzeroberfläche (GUI, graphical user interface) entwickelt, mit der die Geschwindigkeit und andere Parameter eingestellt werden können. Außerdem soll es möglich sein, eine CSV-Datei zu exportieren, die als Messprotokoll verwendet werden kann.

3.4 Morphologischer Kasten

Ein wichtiges Werkzeug zur Erstellung möglicher Konzepte für das Reinigungsmodul des Prüfstandes ist der Morphologische Kasten. Für die verschiedenen Anforderungen und Funktionen des Reinigungsmodul werden Lösungsansätze in Kategorien wie z. B. Rahmenform oder Abstützung auf dem Solarpanel gesammelt. Aus jeder Kategorie wird mindestens ein Lösungsansatz ausgewählt und zu drei Konzepten ausgearbeitet. Zu jedem Konzept wird eine Skizze angefertigt, um die Qualitäten oder Hindernisse zu veranschaulichen, die die verschiedenen Lösungsansätze beinhalten können. Abbildung 3.3 zeigt den morphologischen Kasten mit den Attributen der einzelnen Konzepte.

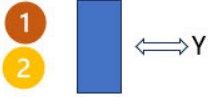
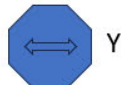
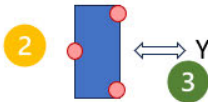
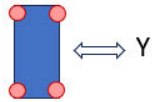
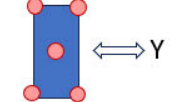
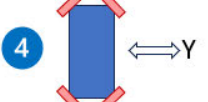
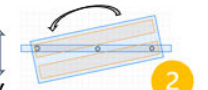
Konzepte 1-4		Varianten			
		1	2	3	4
1	Rahmenform				
		Rechteck	Quadrat	Achteck	Zwölfeck
2	Abstützung Position				
		3 Räder	4 Räder	5 Räder	X Drive
3	Räder				
		Schwenkrolle	Mecanumrad	Kugelrad	Skateboard Rollen
4	Höhenverstellung				
		Schraube / Spindel	Klemmen	Ratsche	Scherenheber
5	Winkelverstellung				
		Steckplätze im Rahmen	verdrehbarer Bügel	ohne	
6	Bürsten				
		Roboterstaubsaugerbürsten	große Bürsten, Handel	Profilwelle	
7	Kraftübertragung				
		Zahnriemen	Zahnrad	direkt am Motor	

Abbildung 3.3 Morphologischer Kasten mit 4 Konzepten

Die Ausrichtung der Bürsten, wie z.B. das Prinzip der Straßenreinigung mit Tellerbürsten senkrecht zur Standfläche als Option, ist nicht im Morphologischen Kasten enthalten, sollte aber nach Möglichkeit in die Konzepte aufgenommen werden.

3.4.1 Konzept 1

In Abbildung 3.4 zeigt Konzept 1 des Reinigungsmoduls des Prüfstands. Es ist auf die Vielfalt der Bürstenmaterialien ausgerichtet und bietet die Möglichkeit, in drei Slots gleichzeitig verschiedene Bürsten bei gleicher Drehzahl und Verfahrensgeschwindigkeit zu testen. Die Anordnung der Räder ermöglicht ein sicheres Überfahren der Spalten zwischen den Solarmodulen in Y-Richtung. Beim seitlichen Verfahren des Reinigungsmoduls in X-Richtung werden nur die kleinen Rollen der Omni Wheels genutzt. Dies kann zu einem höheren Energieverbrauch führen und erschwert das Überfahren von Kanten und Spalten zwischen den Solarmodulen. Eine Winkelverstellung wurde nicht realisiert. Die Führung im Portalrahmen erfolgt über jeweils einen seitlich am Rahmen angebrachten Stift, der als Gegenstück eine vertikale Nut am Portalrahmen benötigt.

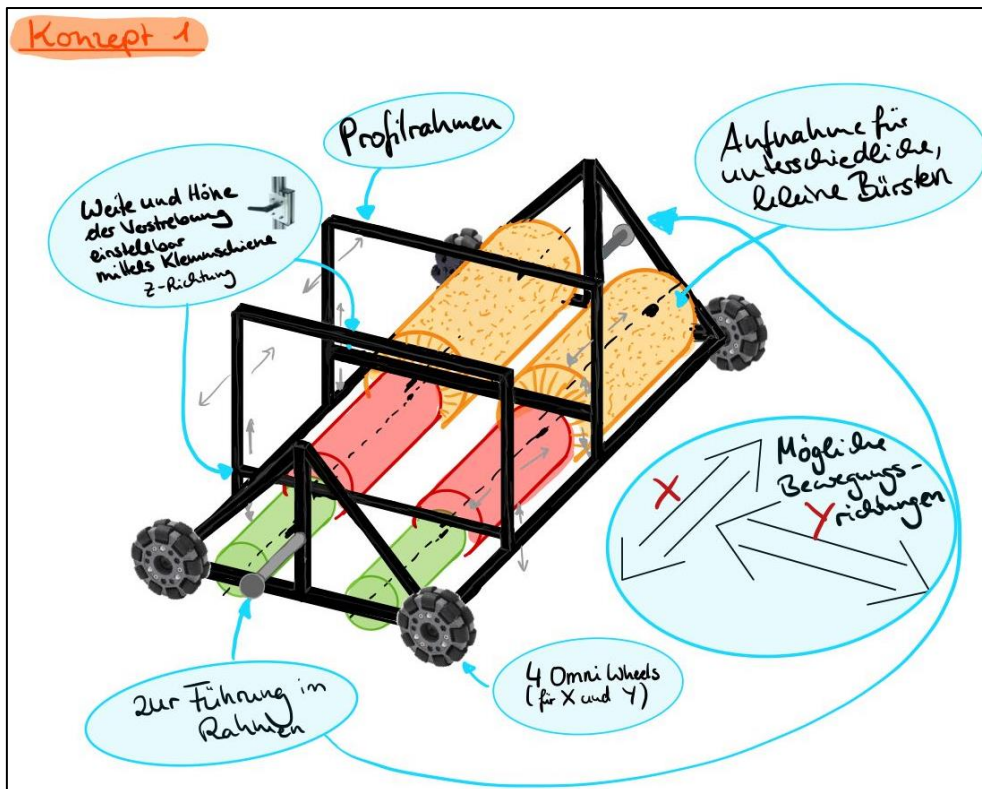


Abbildung 3.4 Konzept 1 Reinigungsmodul

Die Herausforderung bei diesem Konzept liegt in der Kraftübertragung zwischen den Bürsten bei unterschiedlichen Bürstendurchmessern, da deren Wellen nicht auf einer Höhe liegen und somit auch in der unabhängigen Höhenverstellung zum Solarmodul. Durch die Hintereinanderschaltung mehrerer Bürsten ist es zwar möglich, verschiedene Bürstenmaterialien mit gleichen Parametern und unter gleichen Störgrößen zu prüfen, es ist jedoch nicht möglich, den Energieverbrauch einer einzelnen Bürste zu bestimmen.

3.4.2 Konzept 2

Die Stärken des 2. Konzeptes liegen in der stufenlosen Winkelverstellung der Bürste in der X-Y-Ebene. Es ist in Abbildung 3.5 skizziert. Die Höhenverstellung mittels Scherenheber der Bürsten in Z-Richtung kann an beiden Bürsten nicht unabhängig voneinander vorgenommen werden. Daher muss der Durchmesser beider Bürsten immer gleich groß sein. Allerdings ist die Höhenverstellung mit wenigen Handgriffen möglich. Über drei Schwenkrollen wird das Reinigungsmodul abgestützt. Die Kraftübertragung ist einfach gehalten, sodass die Motoren direkt mit den Bürstenwellen verbunden sind. Der Rahmen ermöglicht eine stabile Lagerung, allerdings sind die Bürsten für einen Wechsel nicht leicht zugänglich.

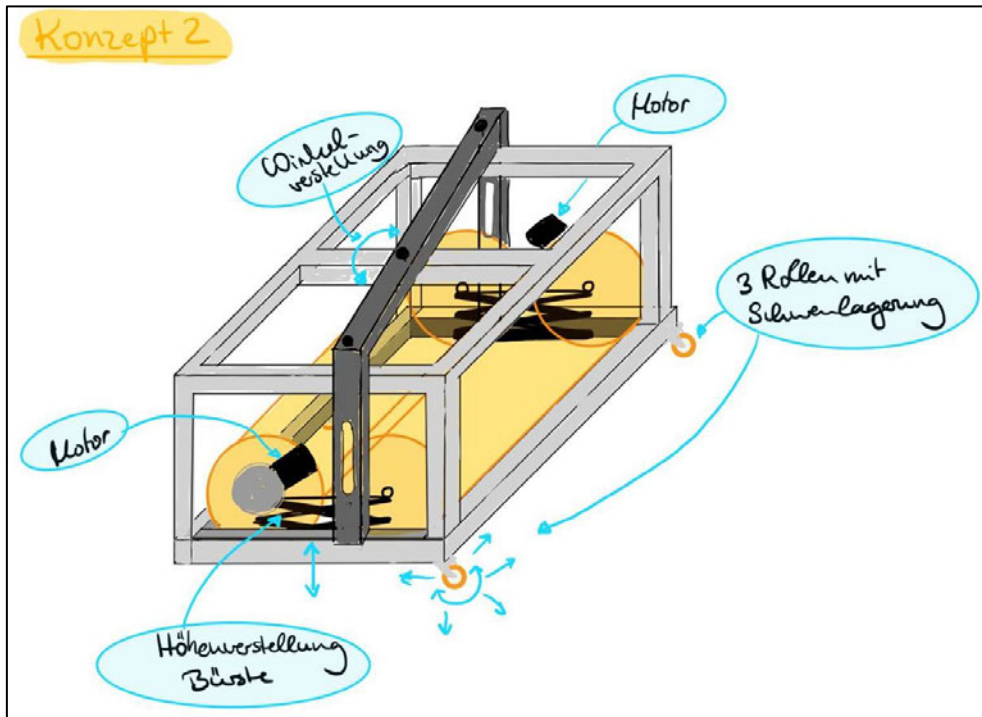


Abbildung 3.5 Konzept 2 Reinigungsmodul

3.4.3 Konzept 3

Konzept 3 ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Es verfolgt einen neuen Ansatz der Winkelverstellung. Die Bürsten sollen über Steckplätze im zwölfseitigen Rahmen verschoben werden können, sodass der Einfluss der Winkelverstellung getestet werden kann. Dabei bleibt die Ausrichtung des Rahmens und damit die Position der Räder konstant. Die Abstützung erfolgt über drei Kugelrollen, die unabhängig von Richtungsänderungen ein konstantes Verhalten beim Überfahren von Kanten ermöglichen, was bei Schwenkrollen nicht gewährleistet wird. Es ist jedoch unklar, wie gut sie auf einer staubigen Oberfläche funktionieren. Ihre Auflagefläche ist sehr klein, und beim Einsatz auf Glas ist eine gute Gewichtsverteilung wichtig, um Beschädigungen zu vermeiden.

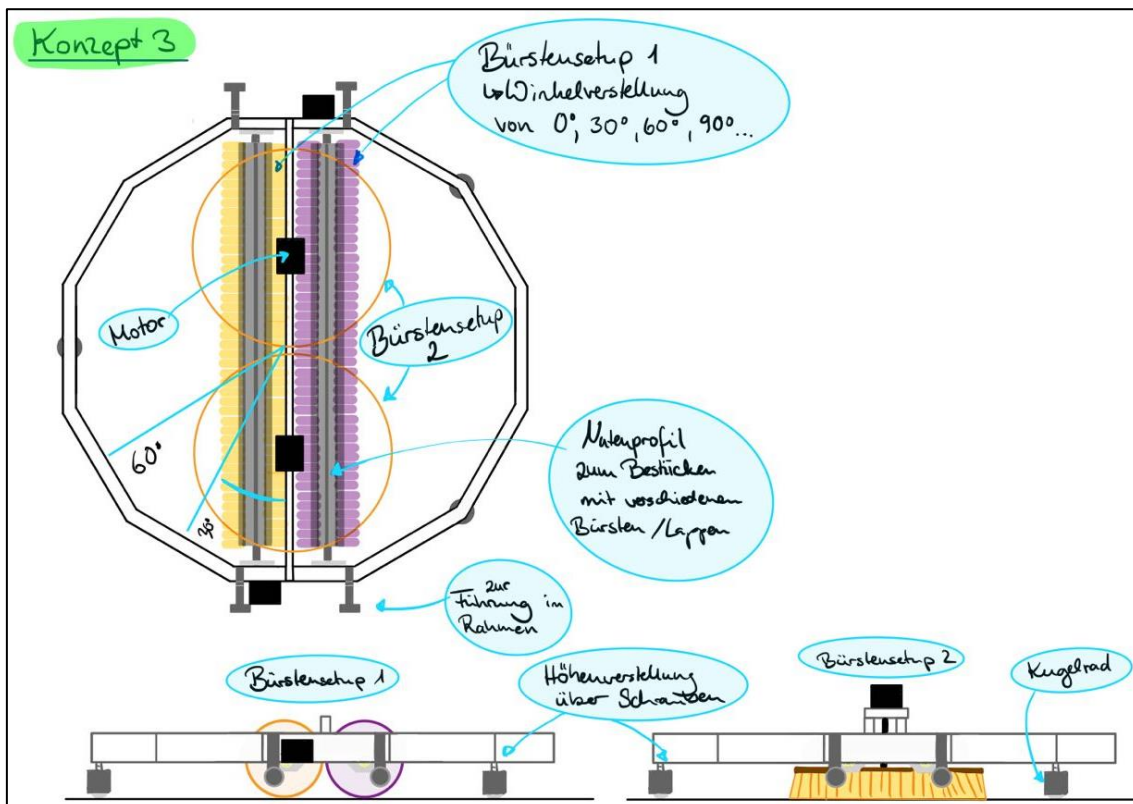


Abbildung 3.6 Konzept 3 Reinigungsmodul

Die Ausrichtung der Bürste senkrecht zum Solarmodul, in Anlehnung an das Konzept der Straßenreinigung, wurde in diesem Konzept berücksichtigt. Dazu wird auf dem Rahmen ein Träger montiert, der die Tellerbürsten und Motoren hält.

Die Höhenverstellung der Bürste erfolgt über Gewindestäbe in der Befestigung der Räder zum Rahmen. Dies ermöglicht zwar eine sehr genaue Höhenverstellung, erfordert allerdings auch eine gewisse Einstellzeit bei großen Unterschieden zwischen den Bürstendurchmessern.

3.4.4 Konzept 4

Aus den drei vorangegangenen Konzepten wird ein viertes, optimiertes Konzept entwickelt, das die Stärken der einzelnen Konzepte vereint und sich auf die wesentlichen Merkmale des Prüfstands konzentriert. Es ist in Abbildung 3.7 dargestellt.

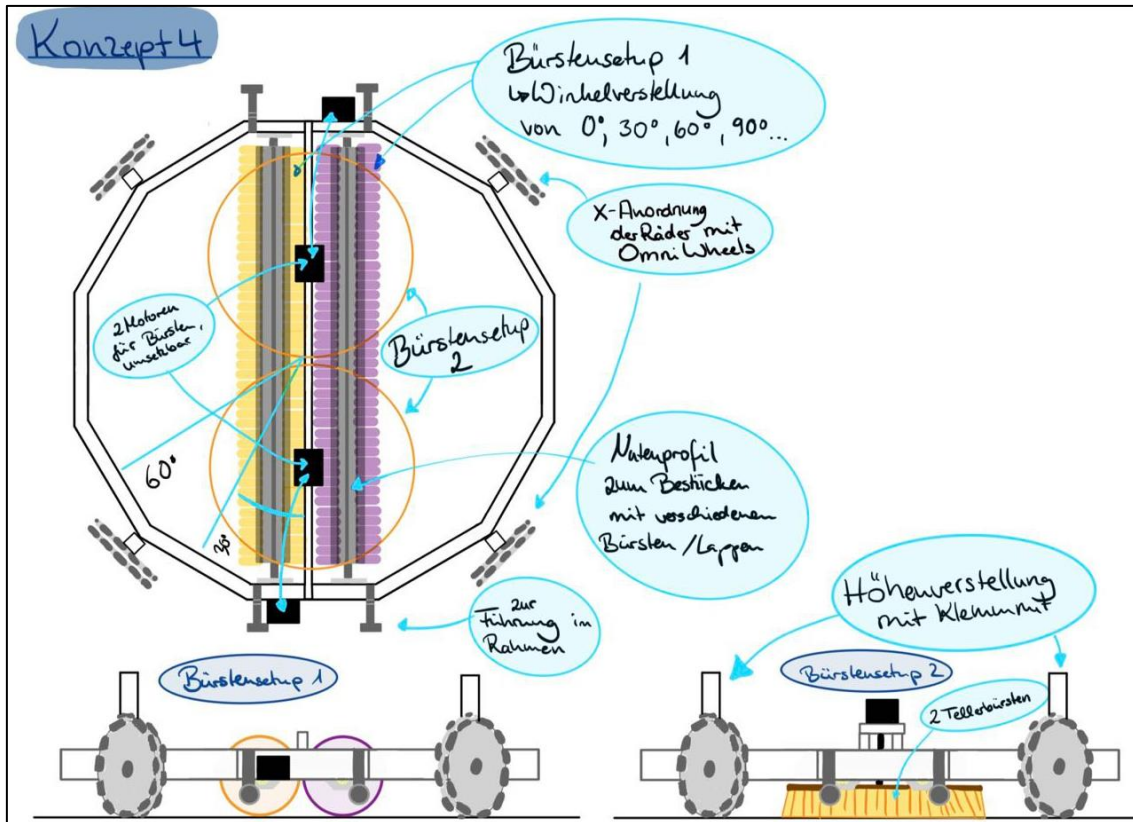


Abbildung 3.7 Konzept 4 Reinigungsmodul

Die Omni Wheels aus Konzept 1 sind vielversprechend und in der X-Anordnung sollte das Überfahren der Lücke zwischen den Solarmodulen sowohl in Y- als auch in X-Richtung gleichermaßen gut und reproduzierbar möglich sein. Da die Winkelverstellung ein interessanter Parameter ist, dessen Einfluss aber nicht genau abgeschätzt werden kann, wird sie durch Steckplätze am Rahmen aus Konzept 3 übernommen. So kann der Einfluss des Bürstenwinkels getestet werden, ohne dass die Gesamtkonstruktion an Stabilität verliert. Die Höhenverstellung der Bürsten in Z-Richtung ist über eine Klemmnut an allen vier Rädern möglich, wodurch leichte Größenunterschiede der beiden eingesetzten Bürsten ausgeglichen werden können. Außerdem kann der Bürstenwechsel durch das offene Design in wenigen Handgriffen durchgeführt werden.

3.5 Gewichtete Punktbewertung

Zur Bewertung der Konzepte wird eine gewichtete Punktbewertung durchgeführt. Dazu werden Entscheidungskriterien und Anforderungen an den Prüfstand mit einer Gewichtung versehen. Dabei soll die Summe der Gewichtung eins ergeben. Als Punkteskala wird die Bewertung nach VDI 2225 [34] gewählt, die von „0“ Punkten für „unbefriedigende Lösung“ bis „4“ Punkte „sehr gute (ideale) Lösung“ reicht. Sie ist zusammen mit der Bewertung der

Konzepte in Tabelle 3.3 dargestellt. Zunächst werden die ersten drei Konzepten bewertet und darauf aufbauend wird das 4. Konzept entwickelt. Zur Verifizierung wird auch dieses unter den gleichen Kriterien bewertet.

Nr.	Kriterium	Gewichtung	Konzept 1		Konzept 2		Konzept 3		Konzept 4 aus 1-3	
1	Winkelverstellung	0,09	0	0,00	4	0,35	2	0,17	2	0,17
2	Robuster Aufbau	0,13	3	0,39	4	0,52	3	0,39	3	0,39
3	Widerholgenaue Anwendung	0,13	3	0,39	3	0,39	4	0,52	4	0,52
4	geringes Gewicht	0,09	2	0,17	3	0,26	4	0,35	4	0,35
5	geringe Kosten	0,09	2	0,17	3	0,26	4	0,35	4	0,35
6	Höhenverstellung Bürste	0,13	3	0,39	2	0,26	3	0,39	3	0,39
7	geringe Umrüstezeit	0,13	2	0,26	3	0,39	4	0,52	4	0,52
8	Unebenheiten überfahrbar	0,09	4	0,35	2	0,17	1	0,09	4	0,35
9	Umrüstbarkeit auf Tellerbürste	0,09	3	0,26	2	0,17	4	0,35	4	0,35
10	variable Bürsten Materialien	0,04	3	0,13	2	0,09	4	0,17	4	0,17
Summe		1,00	2,52		2,87		3,30		3,57	
			63%		72%		83%		89%	

Bewertung nach VDI 2225	
Punkte	Beschreibung
0	unbefriedigende Lösung
1	gerade noch tragbare Lösung
2	Ausreichende Lösung
3	gute Lösung
4	sehr gute (ideale) Lösung

Tabelle 3.3 Gewichtete Punktbewertung der Konzepte 1-4

Wenn die Ergebnisse sehr nahe beieinander liegen, sollte eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden, bei der die Gewichtung leicht variiert und die Ergebnisse erneut überprüft werden. In diesem Fall ist ein Unterschied von 10 % zwischen den ersten drei Konzepten ausreichend aussagekräftig.

3.6 Risikoanalyse

Zur Vermeidung von Risiken und Fehlfunktionen wird eine FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) durchgeführt. Dabei werden die Bauteile sowie deren Funktionen betrachtet und eine Bewertung der Fehlerwahrscheinlichkeit und -schwere mittels Punktesystem vorgenommen. Es werden Punkte von 1 bis 10 für die Bedeutung, das Auftreten und die Entdeckung vergeben und anschließend miteinander multipliziert. Daraus ergibt sich die Risikoprioritätszahl. Ein hoher Punktwert zeigt Schwachstellen in der Konstruktion auf, sodass bereits im Entwicklungsprozess Optimierungsmaßnahmen getroffen werden können. Die FMEA beleuchtet mögliche Fehler und Fehlerfolgen und zeigt dabei den derzeitigen und den optimierten Zustand. Die Anwendung der FMEA beginnt mit Ausarbeitung des Konzeptes und wird auch während der Funktionstest des Prototyps fortgesetzt. Nicht alle Optimierungen werden umgesetzt, dies hängt vom Aufwand und der Höhe des Verbesserungspotenzials ab. Für die Realisierung des Prototyps soll, das Gesamtsystem funktionsfähig sein und keine größeren Risiken bergen.

Tabelle 3.4 zeigt einen Auszug aus der FMEA. Pos. 16 beschreibt die Kollision der Bürste mit den Bürstenadaptern der kleinen Bürste, falls diese beim Umrüsten nicht abmontiert werden. Es ist sehr wahrscheinlich zu vergessen die Adapter zu entfernen, daher ist der Punktwert für das Auftreten hoch. Die Optimierung die Wellenstümpfe zu kürzen ist mit wenig Aufwand verbunden und vielversprechend, dadurch wird diese Optimierung direkt umgesetzt.

Die Drehmomentübertragung der Riemenscheibe vom Motor auf die Bürste ist in Pos. 21 thematisiert und die Optimierung einer Passfederverbindung anstelle der Klemmung über Madenschraube wurde durchgeführt.

In Anhang D ist die gesamte FMEA hinterlegt.

FMEA										Produktname		DUSTe		Änderungsstand		29.01.2024		Seite 2	
Design-FMEA										Produktnummer		00001		erstellt durch		Marlene Bartschies			
										Datum		14.12.2023							
Bauteil	Nr	mögliche Fehler / Fehlfunktion	Fehlerursache	Fehlerfolge	Derzeitiger Zustand				Verbesserter Zustand										
					Vermeidungs-Maßnahme	Entdeckungs-Maßnahmen	Bedeutung 1-10	RPN	empfohlene Maßnahme	Bedeutung 1-10	RPN	Risikoprioritätsz							
Bürsten-schlitzen	Bürsten-schlitten	Rahmen löst sich beim Anheben des Bürstenschlittens	Schrauben wurden nicht festgezogen	Herabfallen des Rahmens, Verletzungsgefahr	beim Anheben des Seitenblechs unter die Befestigungsschrauben am Rahmen	6	5	4	120	Schnellsperner statt Schrauben verwenden	6	5	4	120					
	Bürstenwelle	13 Materialversagen, Bruch	Belastung nicht korrekt erkannt	Ausfall der Bürste	keine	Sichtprüfung	6	3	7	126	Edelstahl als Wellenwerkstoff verwenden	6	1	7	42				
	Bürstenleiste	14 löst sich aus Rundprofilnut	Vibrationen, lockerer Sitz der Bürstenleiste, Zentrifugalkraft zu hoch	Reinigungsergebnis nicht reproduzierbar, verfälscht	keine	Sichtprüfung	4	4	7	112	Positionierleisten seitlich neben Bürstenleiste ins Profil schieben	4	4	7	112				
	Bürste	15 Beschädigen des Solarpanels beim Reinigen	Bürstenmaterial zu hart, Schleifeffekt durch Sand	zerkratztes Solarpanel	weiche Bürsten / Reinigungsmedien verwenden	Sichtprüfung	7	4	3	84	Dauertests zur Materialabrasion durchführen	7	4	3	84				
Bürste	Bürstenwellen-adapter	16 Kollision der Bürste mit Adapter	Adapter ragt in Bereich der Bürste	verfälschte Messergebnisse	Abbauen der Adapter	Sichtprüfung	4	8	5	160	Wellen und Adapter gekürzt	4	2	2	16				
	Flanschlager	17 Außermittigte Position der Bürste	Fluchtungsfehler durch Riemenanspannung, hoher Nachgiebigkeit des Stehlaggers	verfälschte Messergebnisse, Riemenanspannung zu gering, Durchdrutschen	Geringe Riemenanspannung	Sichtprüfung	6	9	4	216	Verwenden anderer Lager auf Seite des Zahnnemenrades	5	5	4	100				
	Bürstenwellen-adapter klein	18 Materialversagen des Adapters	Hohe Kräfte, Fertigungsfehler	Bürste dreht sich nicht, bleibt stecken	keine	Sichtprüfung	3	3	3	27	Widerstandsfähigeres Material verwenden	3	3	3	27				
	Kupplung	19 Kupplung der Bürste nicht festgezogen	Bürste löst sich aus Befestigung	Beschädigung des Solarpanels durch Metallenden der Bürste	keine	Sichtprüfung	7	3	4	84	Ähnliche Hupplung wie für kleine Bürste mit Spannfeder	7	3	4	84				
Antrieb	Motor	20 Beschädigung am Antrieb	Motor zu Stark für Antrieb und Bürste bleibt an Kante von Solarpanel hängen	Beschädigung des Solarpanels durch Metallenden der Bürste	langsames Hochstellen der Drehzahl	Sichtprüfung	6	3	4	72	Rutschkupplung berücksichtigen	6	3	4	72				
	Riemen-scheibe, Motorwelle	21 Kraft wird nicht übertragen	Durchdrutschen der Klemmung mittels Madenschraube	Bürste bewegt sich nicht oder stoppt unerwartet	Klemmung zwischen Zahnnemenrad und Welle durch Madenschraube	Sichtprüfung	8	7	5	280	Passfederverbindung, Passfedernut in Welle und Nabe	8	1	5	40				
	Zahnriemen	22 Reißt oder springt ab	zu hohe Kraft auf Riemen / Fluchtungsfehler der Welle durch selbst-ausrichtende Stehlager	Bürste dreht sich nicht	Riemenanspannung nur so hoch wie nötig, eher gering	Sichtprüfung	6	5	4	120	Verwenden anderer Lager auf Seite des Zahnnemenrades	6	5	4	120				
	Riemen-spannrad	23 Zahnriemen zu locker	Riemenspannrad nicht fest gezogen	Zahnriemen rutscht durch, keine Drehmomentübertragung an Bürste	keine	Sichtprüfung	5	3	3	45	Federgespanntes Riemenspannrad	5	3	3	45				

Tabelle 3.4 Ausschnitt der FMEA

3.7 Versuchsplanung

Um Versuche mit dem Prüfstand durchführen zu können, wurden verschiedene Möglichkeiten zur Ansteuerung und Parametrierung des Prüfstandes entwickelt und von Team Software in einer GUI zusammengeführt. In Abbildung 3.8 ist die GUI abgebildet. Sie soll gleichzeitig die Erstellung eines Messprotokolls ermöglichen, daher kann die auf die Solarmodule aufgetragene Staubmenge, sowie eine Bezeichnung angegeben werden. Über „Nullhöhe“ und „Aktuelle Höhe“ wird die Überlappungstiefe der Bürste zum Solarpanel berechnet, beide Werte müssen manuell eingegeben werden. Es ist möglich, beide Bürsten unabhängig voneinander zu steuern, den Durchmesser und das Material anzugeben und je Bürste eine Drehzahl einzustellen. Erst nach Eingabe aller Werte kann der Prüfstand gestartet werden.

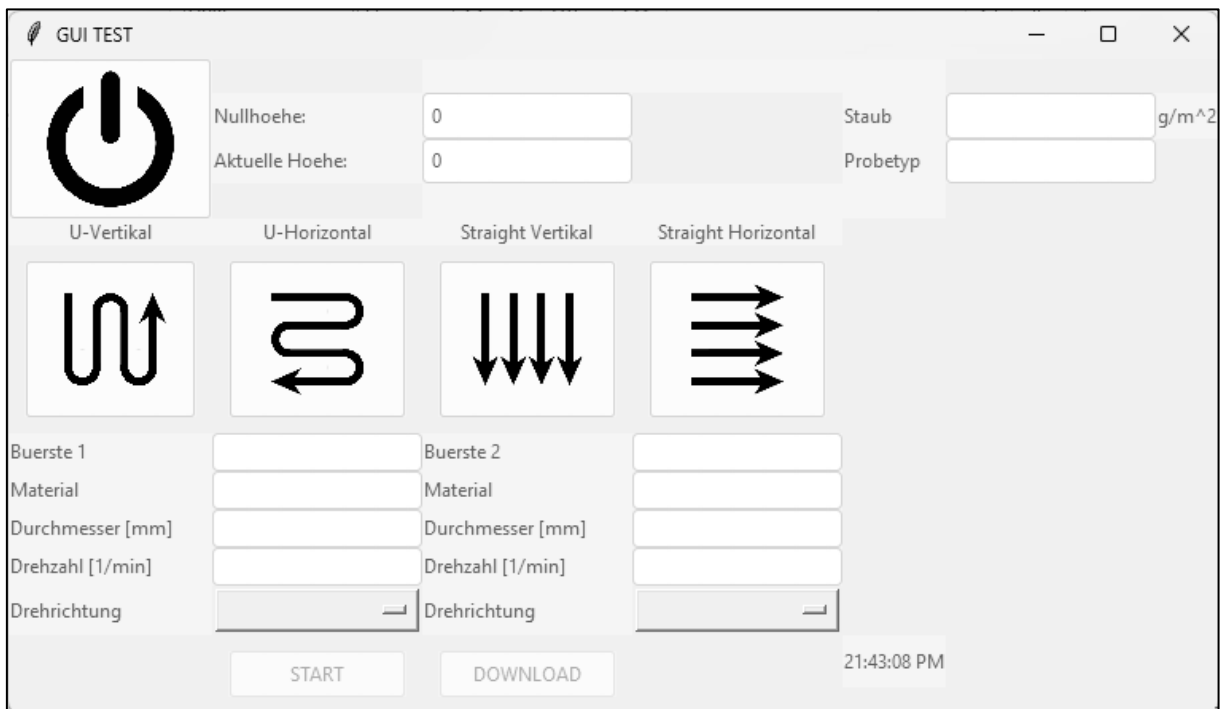


Abbildung 3.8 GUI erstellt von Team Software, mit Einstell- und Ausfüllmöglichkeiten

Das Verfahren in X und Y ist mit den Schaltern in der zweiten Reihe möglich, wie z. B. „U-Vertikal“. Damit können Zyklen eingestellt werden, nach denen der Prüfstand verfährt. Eine Geschwindigkeitseinstellung des Verfahrens des Reinigungsmoduls in X- und Y-Richtung sollte noch nachgerüstet werden, ist aber wegen der geringen Breite des Prüffeldes von nur 2 m schwierig in X-Richtung schwierig.

4 Berechnung und Konstruktion

Die Erstellung des Computer Aided Design-Modells (CAD), die Berechnung von Kräften und Belastungen sowie die Recherche der benötigten Bauteile ist eng verwoben und erfolgt in Iterationsschritten. Es wird nicht auf die einzelnen Schritte, sondern das Ergebnis der Konstruktion und die Entscheidungsgründe eingegangen. Die Unterteilung erfolgt in Baugruppen und Unterbaugruppen, diese sind in Abbildung 4.1 dargestellt.

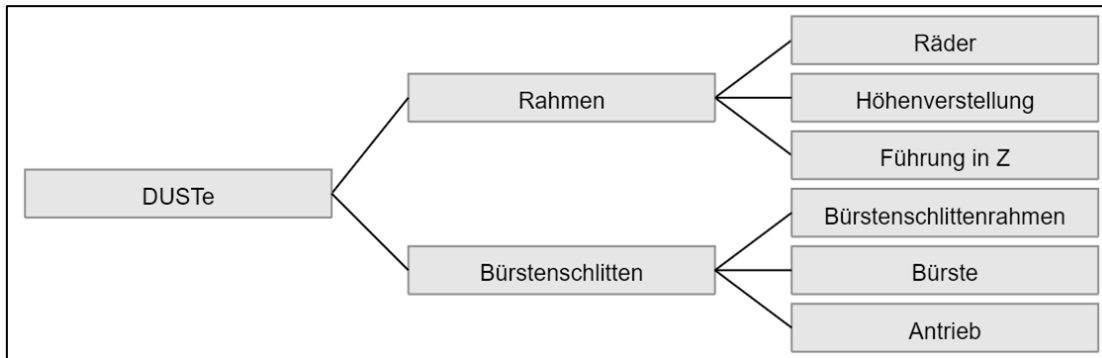


Abbildung 4.1 Einteilung der Konstruktion in Baugruppen und Unterbaugruppen

Im Fokus der Konstruktion stehen die Anpassbarkeit und die Benutzerfreundlichkeit. Damit eine vielfältige und einfache Bedienung ermöglicht wird. Außerdem ist es wichtig wiederholgenaue Ergebnisse zu erzielen. Durch leichte Bauweise und einen dennoch robusten Aufbau können Fehlerfaktoren minimiert werden. Denn ein höheres Gewicht erfordert erhöhten Energieverbrauch der Motoren beim Antrieb. Auch sollen kostengünstige Lösungen gewählt werden, die dennoch die Funktionen ermöglichen.

Ein weiterer Aspekt in der Gestaltung der Bauteile ist die Montier- und Fertigbarkeit mit den zur Verfügung stehenden Möglichkeiten in der HAW Hamburg (Fertigung der Kunststoffteile im 3D Space, Metallbauteile in der zentralen Laborwerkstatt).

4.1 Rahmen

Die Form des Rahmens ergibt sich bereits aus den Überlegungen zum Konzept. Für die Ausarbeitung der Form und Dimensionierung wird die Länge der Rahmenprofilstücke rechnerisch ermittelt, um einen möglichst kleinen Rahmen zu erhalten und dennoch Platz für einen maximalen Bürstendurchmesser von 300 mm und eine Bürstenlänge von 500 mm zu erhalten. Die Berechnungen sind im Anhang E Berechnung zu finden. Um die Anforderungen zum Bürstendurchmesser sowie der Größe einhalten zu können, wird es mehrere Bürstensetups geben, siehe Abschnitt 4.6 Bürstensetups.

In Abbildung 4.2 ist die Baugruppe Rahmen mit allen zugehörigen Bauteilen abgebildet. Ein Ausschnitt der Stückliste dazu ist in Tabelle 4.1 zu finden.

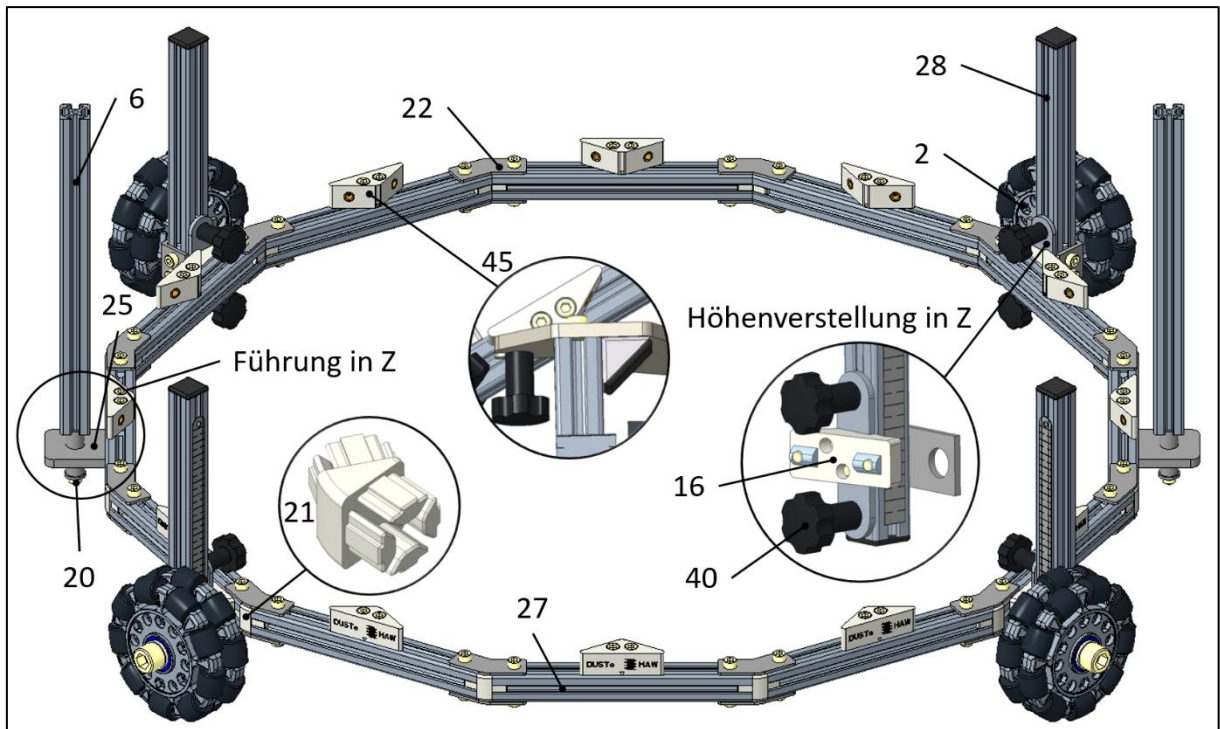


Abbildung 4.2 CAD-Darstellung des Rahmens mit Unterbaugruppen und Zoomansichten

Die Verwendung von Aluminiumprofilen (6, 27, 28) hat mehrere Vorteile, durch die Nuten werden Steckplätze geschaffen, an denen auch nachträglich noch Bauteile befestigt werden können. Das kleinste gängige Profil, hat einen quadratischen Querschnitt von 20 mm Seitenlänge und wird aufgrund der geringen, zu erwartenden Kräfte gewählt. Diese umfassen das Eigengewicht von schätzungsweise 20 kg und Kräfte, die durch den Druck der Bürste auf das PV-Modul und die Führung (6, 20, 25) des DUSTe durch den Portalrahmen entstehen.

Die Verbindung der Profilstücke (27) wird an den Ecken über Verbinderplatten (22) realisiert. Zur Versteifung der Winkel werden Eckverbinder (21) eingesetzt, die einen gleichbleibenden Winkel und Abstand sicherstellen.

Nummer	Benennung / Dateiname
2	Omni_Wheel
6, 27, 28	Item_Profil_5_20x20_Z-Fuehrung, Rahmen, Rad
16	Rad_Adapter
20	Z-Fuehrung_Distanzhuelse
21	Eckverbinder
22	Verbinderplatte
25	Z-Fuehrungsblech
33	Rad_Adapter_blech
34	Winkelverbinder
38	Stahlmass_150
40	Sterngriffschraube M5x25
45	Anschlag_Seitenblech
	Kleinteile

Tabelle 4.1 Ausschnitt der Stückliste. Rahmenbauteile

4.1.1 Höhenverstellung

Die Höhenverstellung wirkt mittels Klemmung über die Profilnut und ermöglicht es, die Höhe der Räder (2) zum Rahmen und somit den Abstand zwischen Solarpanel und Bürste zu verändern. Sie ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Über zwei Sterngriffschrauben (40) kann die Höhe verstellt werden, dabei ist kein Werkzeug notwendig. An allen vier Beinen sind Stahllineale (38) angebracht, sodass die Höhe der Bürste zum Solarpanel millimetergenau eingestellt werden kann. Bild c zeigt eine niedrige Einstellung für kleinere Bürstendurchmesser, Bild d eine hohe Einstellung.

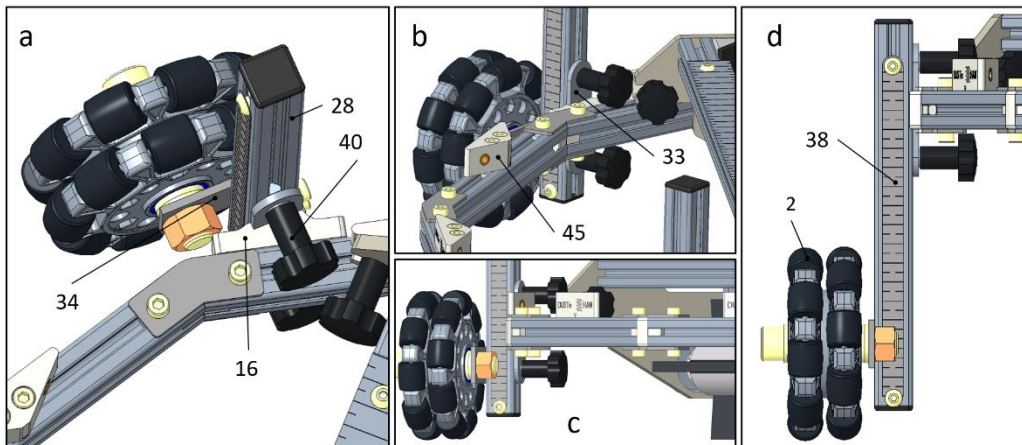


Abbildung 4.3 CAD-Darstellung, Höhenverstellung in Z

4.1.2 Führung in Z

Die Führung in Z-Richtung ist in Abbildung 4.4 dargestellt und verbindet den Portalrahmen mit dem Reinigungsmodul. Der Portalrahmen besteht aus dem Portal und einem Innenrahmen, die im rechten Bild dargestellt sind und über Winkel mit dem Reinigungsmodul verbunden sind. Durch den Portalrahmen wird die Bewegung in X- und Y-Richtung ermöglicht. Die Führung besteht aus einer Hülse (20), die unten am Profil (6) befestigt ist. Das Profil wird am Portalrahmen befestigt und in der Höhe so eingestellt, dass die Führungsplatte zentriert ist. Damit wird sichergestellt, dass durch unebene Solarmodule bedingte Höhenunterschiede zwischen Portalrahmen und Reinigungsmodul von ± 14 mm ausgeglichen werden können.

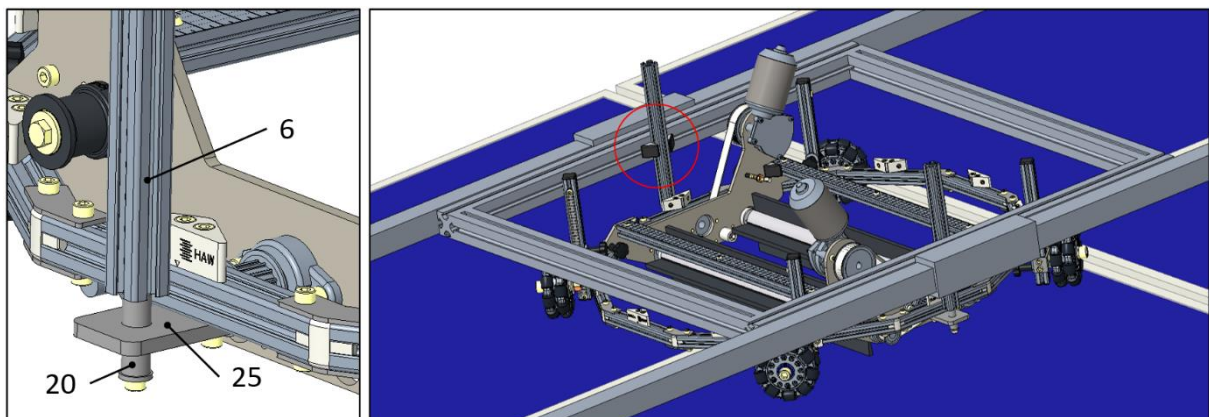


Abbildung 4.4 CAD-Darstellung Z-Führung, Sitz im Portalrahmen

4.1.3 Räder

Für die Räder wird eine X-Anordnung gewählt, die sicherstellt, dass die Kanten zwischen den Solarmodulen in einem Winkel von 45° , d. h. in alle Richtungen gleich gut überfahren werden können. Um eine X-Anordnung wählen zu können, müssen Omni Wheels verwendet werden, da sie in Radrichtung aber auch quer dazu bewegt werden können. Die Freiheitsgrade der Rollen und Räder sind in Abbildung 4.5 in der Mitte dargestellt.

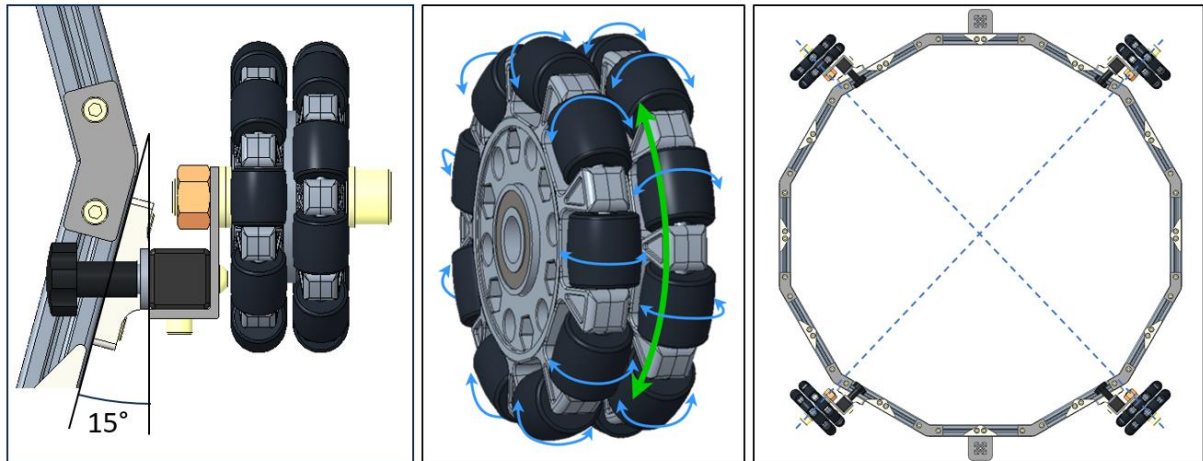


Abbildung 4.5 CAD-Darstellung der Räder, Radhalterung, Freiheitsgrade, X-Anordnung

Um die X-Stellung der Räder zum Rahmen zu ermöglichen, wird ein Winkeladapter (16) benötigt, der die Räder in einem 15° Grad Winkel zum zwölfeckigen Rahmen ausrichtet. Dies ist in, Abbildung 4.5 links dargestellt. Die Breite des Reinigungsmoduls soll insgesamt möglichst schmal gehalten werden, sodass die Räder seitlich nicht über die Breite des Rahmens hinausragen.

4.2 Bürstenschlitten

Die Funktion des Bürstenschlittens ist es, die Bürsten und den Antrieb aufzunehmen und zusammen mit dem Rahmen die gesamte Konstruktion zu versteifen. Der Bürstenschlitten kann durch Lösen der vier Sterngriffschrauben (40) vom Rahmen abmontiert und in 30° Grad Schritten auf insgesamt sechs verschiedene Positionen montiert werden. In Abbildung 4.6 ist der Bürstenschlitten in der Draufsicht mit den möglichen Steckplätzen dargestellt.

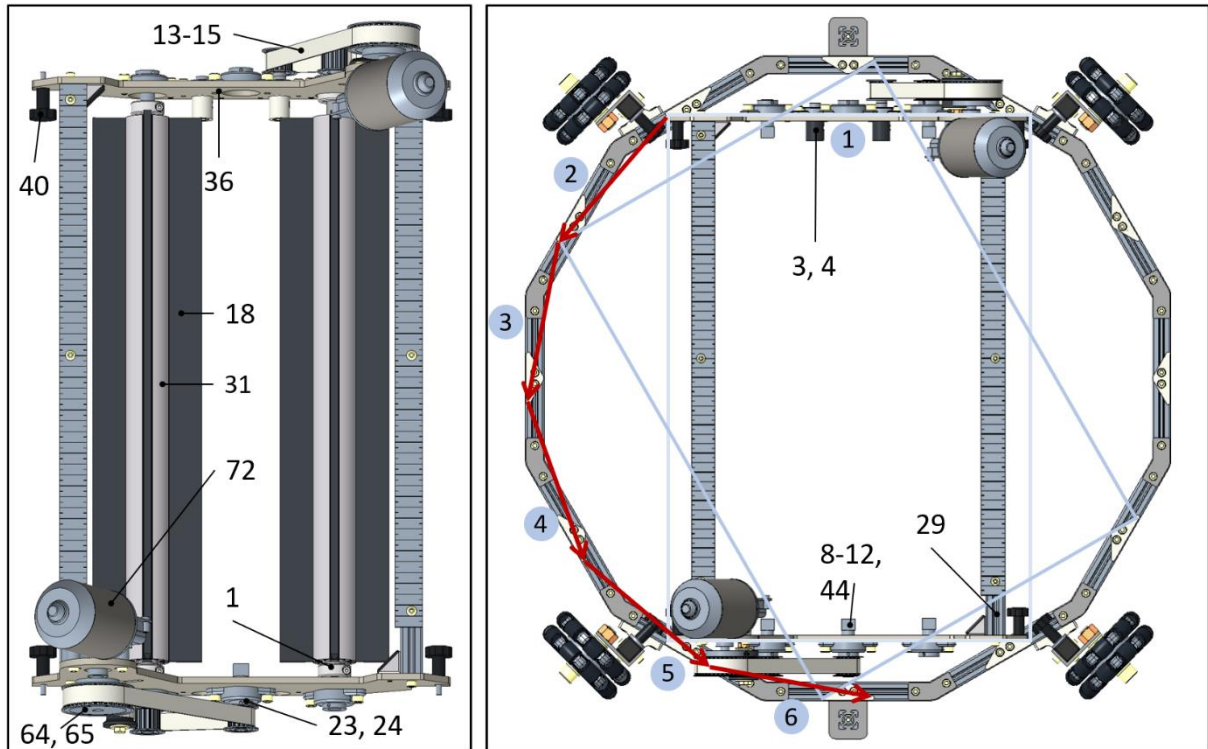


Abbildung 4.6 CAD-Darstellung, Bürstenschlittenlinks und Winkelverstellung des Bürstenschlittens rechts

Nummer	Benennung / Dateiname
1	Klemmring_D14
3, 4, 73	Adapter, kleine Bürste, Spannfeder
5	Kleine Bürste
7, 67, 68	Riemenspannrad, Gleitlagerwelle und -buchse
8-12, 44	Wellenstümpfe
13, 14, 15	Zahnriemen_AT5_16
18, 31, 43	Bürste, Rundprofil, Adapter
23, 24	Flanschlager
29, 30	Item_Profil_5_20x20_Versteifung, Mittelbalken
36, 37	Seitenblech, mittiges Seitenblech
64, 65	Riemenscheibe z16, Riemenscheibe z40
72	Motor
	Kleinteile

Tabelle 4.2 Ausschnitt Stückliste, Bauteile des Bürstenschlittens

Damit beide Bürsten unabhängig voneinander angesteuert werden können, sind zwei Bürstenmotoren (72) vorgesehen, sie sind jeweils auf einer Seite des Bürstenschlittens positioniert, da sie die schwersten Bauteile der Konstruktion sind und dadurch das Gewicht gut ausgeglichen ist (siehe Abbildung 4.6).

4.2.1 Seitenbleche

Die seitliche Abstützung der Bürsten durch Seitenbleche erfordert zwar einen größeren Rahmen, ermöglicht aber die Anordnung der Bürsten in einem größeren Abstand zueinander, als es die Länge einer Seite des zwölfseitigen Rahmens zulässt. Der Kompromiss, eine große Bandbreite an Bürstendurchmessern und dennoch einen möglichst kleinen Rahmen des Reinigungsmoduls zu entwickeln, führt zur Wahl mehrerer Bürstensetups (Abschnitt 4.6). So können bis zu einem Durchmesser von 150 mm zwei Bürsten verwendet werden, bei einem größeren Durchmesser bis 300 mm kann nur eine Bürste eingesetzt werden.

Für die Seitenbleche (36) wird ein 6 mm dickes Aluminiumblech verwendet. Dadurch können die Gewindebohrungen direkt in das Blech eingebracht werden, sodass kürzere Schrauben verwendet werden können und auf Muttern verzichtet werden kann. In Abbildung 4.7 ist links das Seitenblech mit Motor 1 dargestellt, das Seitenblech auf der gegenüberliegenden Seite des Bürstenschlittens hat die gleiche Form. Rechts in Abbildung 4.7 ist das mittlere Seitenblech (37) dargestellt, es wird für das Setup mit kleinen Bürsten (5) verwendet und ist am Mittelbalken (30) montiert. Dieser kann auf die Länge der Bürsten eingestellt werden.

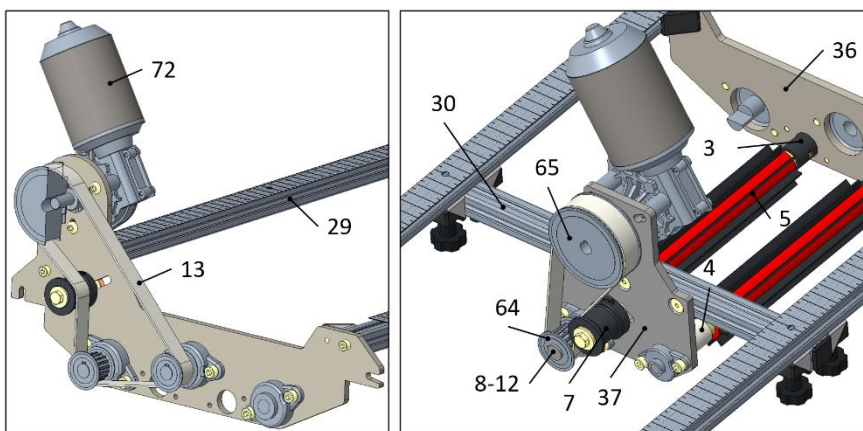


Abbildung 4.7 CAD-Darstellung Seitenblech, mittleres Seitenblech

Die Befestigungspunkte für die Motoren werden als drei strahlenförmige Langlöchern in 120° Grad zueinander in gängigen Teilkreisdurchmessern für Scheibenwischermotoren erstellt, da für den ausgewählten Motor keine Information zu Abstand und Größe der Befestigungsschrauben vorliegen. Außerdem könnte später auch ein anderer Scheibenwischermotor eingebaut werden, falls die Leistung zu hoch oder niedrig erscheint.

Um Gewicht zu sparen, bestand die Überlegung weitere Aussparungen an weniger belasteten Positionen hinzuzufügen, allerdings wirken die Seitenbleche auch als Abschirmung zwischen dem Staub, der von den Bürsten aufgewirbelt wird und dem Antrieb mit Riemenscheiben (65) und Zahnriemen (13), sodass darauf verzichtet wird.

4.3 Antrieb

Der Antrieb der Bürsten erfolgt über Zahnriemen, Riemenscheiben und Scheibenwischermotoren. Der Motor 2 im linken Bilde der Abbildung 4.8 treibt den Riemen 2 und damit sowohl die Bürste im Setup der mittelgroßen Bürsten als auch eine der kleinen Bürsten an. Motor 1 und Riemen 1 werden für das Setup der mittleren und der großen Bürste verwendet. Zum Umrüsten auf das kleine Bürstensetup wird Motor 1 mit Riemen 3 am mittleren Seitenblech montiert, dies ist im rechten Bild dargestellt.

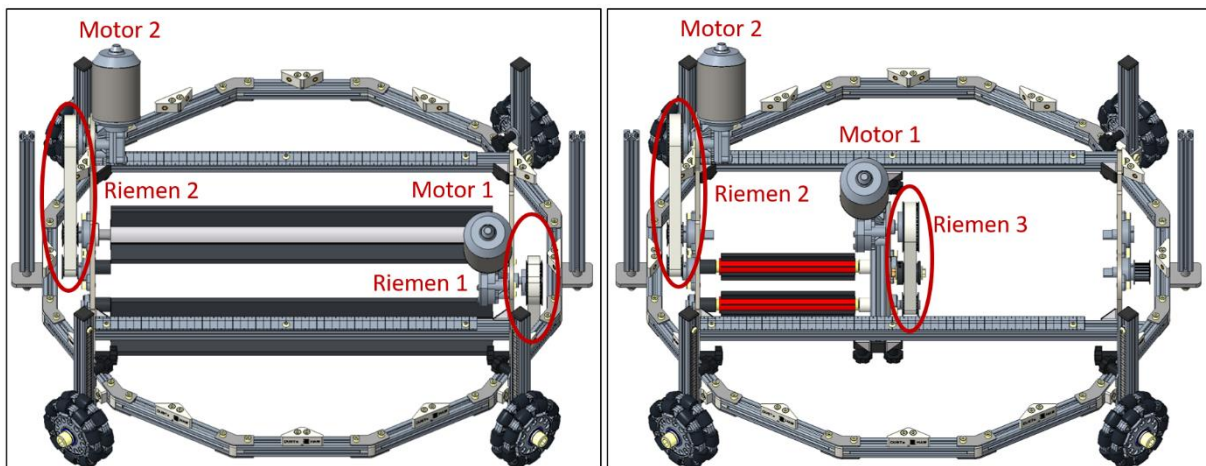


Abbildung 4.8 CAD-Darstellung, Bürstensetup 1 und 2, Position der Riemen

4.3.1 Motorleistung

Die Vergleichstabelle der Solarreiniger in Abschnitt 3.1 und Anhang A kann zur Abschätzung der Motorleistung verwendet werden. Diese sollte demnach zwischen 50 und 250 W liegen und einen Drehzahlbereich zwischen 0 u/min und 500 u/min abdecken. Die meisten Elektromotoren laufen am stabilsten bei Drehzahlen von 3000 u/min und darüber. Eine Reduzierung der Drehzahl von 3000 u/min auf 500 u/min bedeutet, dass ein großes Zahnrad auf die Bürstenwelle montiert werden muss. Dies wiederum begrenzt den kleinsten Bürstendurchmesser auf die Größe dieses Zahnrades. Die einfachste und kostengünstigste Lösung ist die Verwendung von Scheibenwischermotoren, die zudem auch relativ klein sind. Durch ihr integriertes Schneckengetriebe laufen sie mit niedriger Drehzahl. Der gewählte Scheibenwischermotor hat eine Leistung von 50 W, läuft mit 220 u/min und wird mit 24 V betrieben.

Die Reibung durch die Bürste ist schwer abzuschätzen, sodass die Reinigungskraft berechnet wird, die bei der Leistung von 50 W erreicht werden kann. Dabei wird der Luftwiderstand vernachlässigt und von einer konstanten Beschleunigung ausgegangen.

$$P = F \cdot v = 2 \cdot \pi \cdot M \cdot n \quad (4.1)$$

Mit der Gleichung (4.1) kann bei einer Leistung ($P_{Bü}$) von 50 W und der maximalen Drehzahl ($n_{Bü}$) von 500 u/min das Gesamtdrehmoment (M_{ges}) berechnet werden. Das Gesamtdrehmoment (M_{ges}) beträgt 0,95 Nm und setzt sich aus dem Anfahrmoment (M_{Anf}), dem Bürstenreibmoment ($M_{ReibBü}$) und dem Lagerreibmoment (M_{Reib}) zusammen, die addiert

werden. Das Lagerreibungsmoment kann durch die kleinen Lagerdurchmesser vernachlässigt werden.

$$M_{Ant} = J \cdot \frac{\omega}{t} \quad (4.2)$$

Zur Berechnung des Anfahrmoments (M_{Anf}) mit Gleichung (4.2) wird das Massenträgheitsmoment ($J_{Bü}$) nach Gleichung (4.3) benötigt. Zur Vereinfachung wird von einem homogenen Vollzylinder mit einem Radius ($r_{Bü}$) von 150 mm und einem Bürstengewicht ($m_{Bü}$) von 1,5 kg angenommen.

$$J = \frac{1}{2} m \cdot r^2 \quad (4.3)$$

Das Massenträgheitsmoment ($J_{Bü}$) beträgt 0,01688 kg/m².

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n \quad (4.4)$$

Die Winkelgeschwindigkeit ($\omega_{Bü}$), die ebenfalls zur Berechnung des Anfahrmoments benötigt wird, kann nach Gleichung (4.4) berechnet werden. Die Zeit (t) aus Gleichung (4.2) zum Erreichen der Drehzahl wird mit 2 s angenommen.

Bei einer Drehzahl ($n_{Bü}$) von 500 u/min ergibt sich eine Winkelgeschwindigkeit ($\omega_{Bü}$) von 52,36 u/s.

Das Anfahrmoment (M_{Anf}) beträgt somit 0,44 Nm und das Bürstenreibmoment 0,51 Nm, wobei nach Erreichen der Drehzahl das Anfahrmoment vernachlässigt werden kann und das Bürstenreibmoment somit 0,95 Nm betragen könnte. Dies entspricht einer Reinigungskraft ($F_{reibBü}$) von 3,42 N bzw. 6,37 N nach dem Anfahren.

Es ist zu prüfen, ob diese Kraft ausreichend ist.

4.3.2 Wellen

Bei der Gestaltung der Wellen besteht die Herausforderung darin, eine Möglichkeit zu schaffen, den Bürstenwechsel mit wenigen Handgriffen durchführen zu können. Aus diesem Grund werden Stumpfwellen (siehe Abbildung 4.9) und Adapterwellenstücke verwendet, die durch ihre halbzyklindrische Form mit den Wellenstümpfen gekoppelt werden.

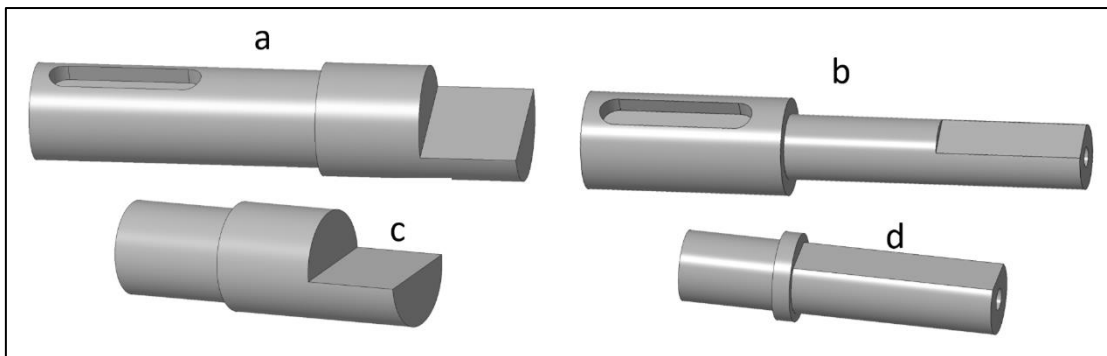


Abbildung 4.9 CAD-Darstellung Wellenstümpfe

Die mit a und b gekennzeichneten Wellen nehmen jeweils eine Riemenscheibe auf und übertragen das Drehmoment auf die Bürste. Die Wellenstümpfe c und d halten die Bürste auf der anderen Seite.

Die Berechnung des erforderlichen Wellendurchmessers wird nach Roloff/Matek [36] durchgeführt, dieser entspricht dem kleinsten Querschnitt, den die Welle unter berücksichtigter Belastung haben sollte und stellt eine Vordimensionierung dar. Wird mit geringer Sicherheit gerechnet, sollte eine Nachberechnung nach DIN 743 durchgeführt werden, die verschiedene Kerbeinflüsse berücksichtigt.

Die Berechnung der Lagerkräfte und Biegemomente zur Ermittlung des Vergleichsmomentes (M_v) erfolgte auf Grundlage des in Abbildung 4.10 dargestellten Freikörperbildes, das beispielhaft für die Standardbürste aufgestellt wird. Die kleinen Bürsten sind deutlich kürzer, wodurch geringere Kräfte zu erwarten sind.

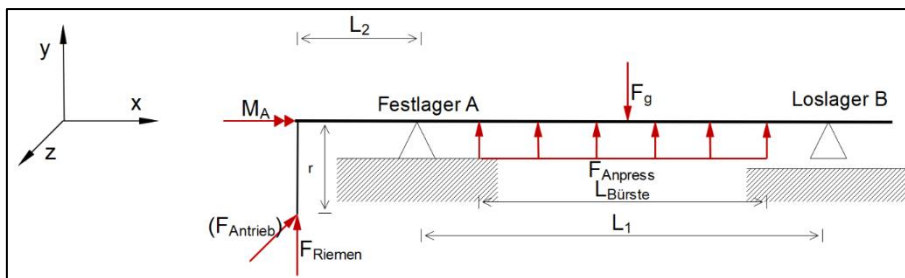


Abbildung 4.10 Freikörperbild Bürstenwelle

Die Bürstenanpresskraft ($F_{Anpress}$) wirkt als Linienlast durch den Druck auf das Solarmodul über die Länge der Bürste ($L_{Bürste}$). In positiver Y-Richtung wird die Riemenspannkraft (F_{Riemen}) und in entgegengesetzter Richtung die Gewichtskraft (F_g) angenommen. Das Antriebsmoment (M_A) kann auch über den Radius (r) der Riemenscheibe und die Antriebskraft ($F_{Antrieb}$) berücksichtigt werden.

Zur Berechnung des Vergleichsmomentes (M_v), mit Gleichung (4.5), wird aus den maximalen Biegemomenten um Y und Z das resultierende Biegemoment (M_{res}) berechnet und für M_b eingesetzt. Für $\sigma_{b\ zul} / \varphi \cdot \tau_{t\ zul}$ wird der wechselnde Belastungsfall für Biegung und Torsion als 1 angenommen.

$$M_v = \sqrt{M_b^2 + 0,75 \cdot \left(\frac{\sigma_{b\ zul}}{\varphi \cdot \tau_{t\ zul}} \cdot T \right)^2} \quad (4.5)$$

Über die Gleichung. (4.6) kann mit dem Vergleichsmoment und der maximal zulässigen Beanspruchung des gewählten Wellenwerkstoffes der Minstdurchmesser (d) ermittelt werden.

$$d \geq \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_v}{\pi \cdot \sigma_{b\ zul}}} \quad (4.6)$$

Als Wellenwerkstoff wird X39CrMo17-1 mit einer dynamischen Bauteilfestigkeit ($\sigma_{b\ WN}$) von 375 MPa gewählt, der sich gut bearbeiten lässt, für Wellen geeignet und korrosionsbeständig ist. Für den rostfreien Stahl wird ein Minstdurchmesser von 1,2 mm berechnet. Dieser Durchmesser ist für eine gute Handhabung zu klein und würde zu einer starken Durchbiegung führen. Daher wird für die Lager der kleinen Bürste ein Minstdurchmesser von 8 mm und für

die größeren Lager von 12 mm gewählt, sodass durch die Form des Halbzylinders mehr als 4 mm übrigbleiben. Um eine Passfederverbindung realisieren zu können, muss der Durchmesser mindestens 10 mm betragen. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Anhang E Berechnung enthalten.

4.3.3 Welle-Nabe-Verbindung

Zur Drehmomentübertragung vom Motor auf die erste Riemenscheibe ist am Scheibenwischermotor bereits eine Passfederverbindung nach DIN 6888 vorgesehen. Alle weiteren auf den Bürstenwellen sitzenden Riemenscheiben werden ebenfalls mit einer Passfederverbindung versehen, jedoch nach DIN 6885 Form A.

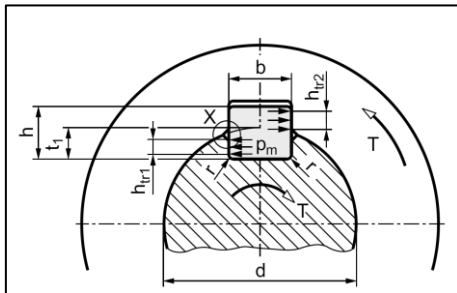


Abbildung 4.11 mittlere Flächenpressung Passfeder [36]

Die Berechnung der Passfederverbindung erfolgt für die gewählte Passfeder DIN 6885-1-A 4 × 4 × 18 wird nach Roloff/Matek [36] Methode C. Sie dient dem Nachweis, dass die gewählte Passfeder, die Wellennut und die Nabennut den auftretenden Kräften standhalten. Die mittlere Flächenpressung (p_m) ist in Abbildung 4.11 dargestellt und kann nach (4.7) berechnet werden. Der Nachweis wird nur für die Nabe aus Aluminium durchgeführt, da die Passfeder aus Stahl und die Welle aus Edelstahl eine wesentlich höhere Festigkeit besitzen.

$$p_m = \frac{2 \cdot T}{d \cdot h_{tr} \cdot l_{tr} \cdot n \cdot \varphi} \leq f_L \cdot p_{zul} \quad (4.7)$$

Als Drehmoment (T) kann das Gesamtdrehmoment (M_{ges}) aus der Motorberechnung mit 0,95 Nm verwendet werden. Die Abmessungen der Passfeder und der Passfedernut können der DIN 6885-1 für einen Wellendurchmesser von 12 mm entnommen werden [5].

Die zulässige Flächenpressung kann nach Gleichung (4.8) mit der Sicherheit (S_F) gegen plastische Verformung und den Werkstoffkennwerten für Aluminium, d. h. der Streckgrenze ($R_{p0,2}$) von 80 MPa berechnet werden. Der Lastspitzenfaktor (f_L) wird vernachlässigt und mit 1 angenommen.

$$p_{zul} = \frac{R_e}{S_F} \quad (4.8)$$

Die zulässige Flächenpressung beträgt 53,33 MPa mit einer Sicherheit (S_F) von 1,5.

Die tragende Höhe (h_{tr}) multipliziert mit der tragenden Länge (l_{tr}) der Passfeder entspricht der Fläche in der Nut, auf die das Drehmoment (T) wirkt. Der Wellendurchmesser (d) und der Tragfaktor (φ), der für eine einzelne Passfeder gleich 1 ist, sowie die Bürstendrehzahl von 500 u/min werden bei der Berechnung der mittleren Flächenpressung (p_m) berücksichtigt.

Die tragende Nabennuttiefe (h_{tr2}) kann nach Gleichung (4.9) berechnet werden, sie ist ebenfalls in Abbildung 4.11 eingezeichnet. Der Eckenradius der Passfeder (r) wie auch der Kantenradius der Nut (s_2) mit 0,1 mm angenommen.

$$h_{tr2} = h - t_1 - (r + s_2) + 0,5 \cdot \left(d - \sqrt{d^2 - (b + 2 \cdot s_2)^2} \right) \quad (4.9)$$

Daraus ergibt sich eine Nabennuttiefe von 1,38 mm und eine mittlere Flächenpressung (p_m) von 22,86 MPa. Die Passfederverbindung hat somit eine Sicherheit von mindestens 3,4.

4.3.4 Zahnriemen

Da Riemen können nur in bestimmten Längen als Endlosriemen gekauft werden können, eignet sich die Browseranwendung von Mädlar [20]. Dort können handelsübliche Riemenscheiben über ihren Durchmesser und die Zähnezahl ausgewählt werden und ihre Achsmittelpunkte (siehe Abbildung 4.12) eingetragen werden.

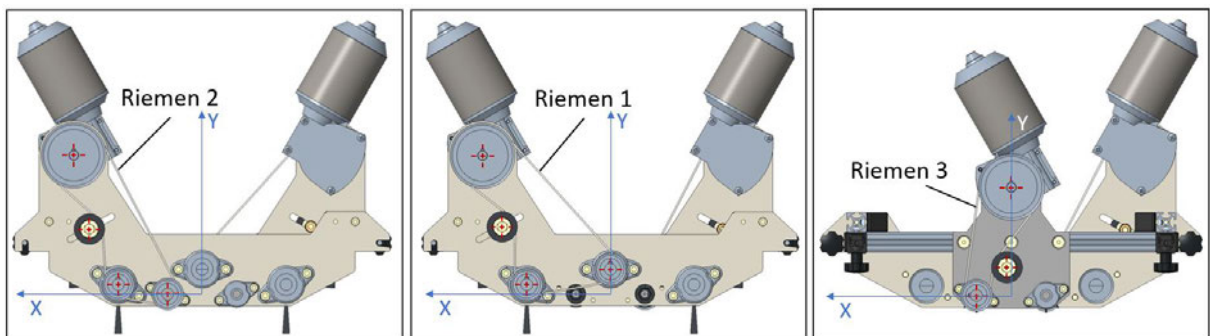


Abbildung 4.12 CAD-Darstellung, Position der Riemenscheiben und Riemen 1-3

Es wird die nächstgrößere Riemenlänge ausgewählt. Um sicherzustellen, dass der Riemen nicht zu lang ist, wird ein Riemenspannrad im CAD ergänzt sowie ein simulierter Riemen, dessen Länge im CAD grob gemessen werden kann. Nach Anpassen der Position der Mittelachsen werden die Riemenlängen auf 545 mm, 500 mm und 375 mm festgelegt. Die Riemenbreite beträgt 16 mm damit eine Sicherheit von über 1,5 bei einem AT5-Riemen eingehalten werden kann.

Auch die Berechnung der Sicherheit ist über die Browseranwendung von Mädlar [20] möglich. Dazu wird das Drehmoment (M_t) aus der Berechnung der Motorleistung der Bürste aus Abschnitt 4.3.1 und das Übersetzungsverhältnis (i) benötigt. Das erforderliche Übersetzungsverhältnis (i_{eff}) kann über die maximale Drehzahl (n_{Ant}) des Motors von 220 u/min und der gewünschten Drehzahl von 550 u/min mit (4.10) auf i gleich 2,5 berechnet werden. Damit eine Drehzahl von 500 u/m auf jeden Fall erreicht werden kann, wurde der Wert um 10 % erhöht.

$$i = \frac{z_{Ant}}{z_{Bü}} = \frac{n_{Ant}}{n_{Bü}} \quad (4.10)$$

Für die Berechnung des Übersetzungsverhältnisses gilt $i > i_{eff}$ da durch die Übersetzung Verluste zwischen Motor Bürste auftreten.

Das kleine Zahnrad sollte so klein wie möglich gewählt werden, um den Bürstendurchmesser so klein wie möglich zu halten. Die Zähnezahl ($z_{Bü}$) wird auf 16 mm festgelegt, sodass eine

Welle mit einem maximalen Durchmesser von 12 mm mit Passfeder eingebaut werden kann (Die Auswahl des Wellendurchmessers wird in den Unterkapitel 4.3.3 zur Passfederberechnung sowie 4.3.2 zur Berechnung der Wellendurchmesser näher erläutert.).

Das tatsächliche Übersetzungsverhältnis (i) aus den gewählten Riemenscheiben mit 16 und 42 Zähnen beträgt nach (4.10) 2,63.

Als Sicherheit ergibt sich 2,65 wie in Anhang E Berechnung zum Zahnriemen ersichtlich.

4.3.5 Lagerung

Lager sind an den Achsen der Omni Wheels, sowie an den Bürstenwellen erforderlich. Da für alle Lager keine hohen Kräfte oder Drehzahlen zu erwarten sind, kann die Berechnung zur Lebensdauertragfähigkeit vernachlässigt werden. Die Auswahl der Lager erfolgt anwendungsbezogen und nach Richtung ihrer Belastung [12].

Für die Räder sind einreihige Rillenkugellager mit zylindrischer Mantel- und Innenfläche eine einfache Lösung. Die Lager der Bürsten müssen am Seitenblechen montierbar sein, dazu kann entweder ein Lagergehäuse selbst angefertigt werden oder ein Flanschlager mit Gehäuse gewählt werden.

Durch die leichte Bauweise der Seitenbleche bietet sich die Wahl von Flanschlagern an, da diese bereits ein rautenförmiges Gehäuse besitzen und mit zwei Schrauben an den Seitenblechen befestigt werden können. Die Flanschlager oder auch Stehlager besitzen zusätzlich kleine Feststellschrauben am Bund des Innendurchmessers, mit denen sie gegen axiales Verschieben auf der Welle fixiert werden können. Dadurch können sie ohne Sicherungsringe als Festlager eingesetzt werden. Eine Übersicht über die Lage der Lager ist in Abbildung 4.13 dargestellt.

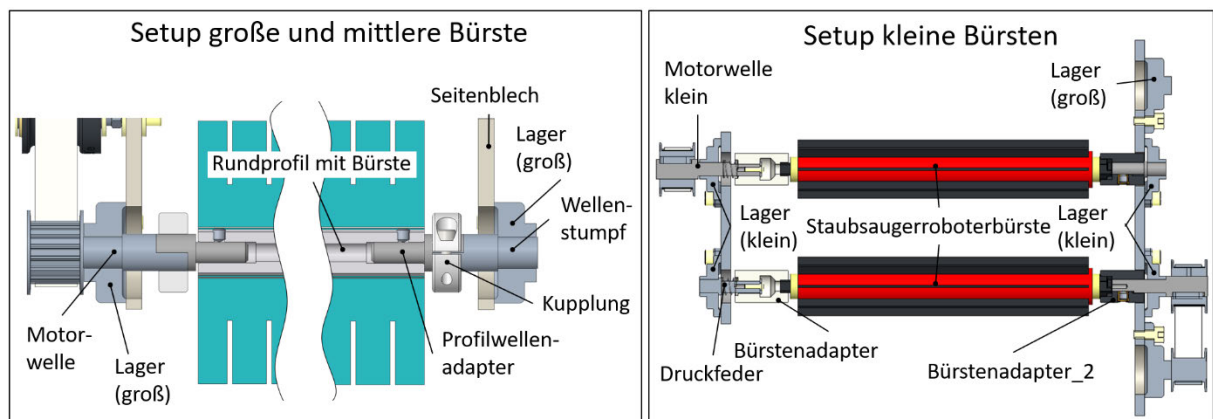


Abbildung 4.13 CAD-Darstellung, Bürsten im Schnitt mit Lagerung und Wellen

4.4 Bürsten

Um eine große Anzahl verschiedener Bürsten testen zu können, soll die Hauptbürste aus einem 500 mm langen Aluminiumrundprofil mit 4 Nuten bestehen. Diese Nuten können mit Bürstenleisten oder Tüchern bestückt werden, sodass nur die Borsten, aber nicht die Welle

gewechselt werden muss. Dies spart Kosten und bietet eine hohe Flexibilität für mögliche Kombinationen, auch mit unterschiedlichen Materialien auf einer Bürste.

Die Anforderung, eine Bürste mit einem Durchmesser von bis zu 300 mm prüfen zu können, erfordert unterschiedliche Bürstenanordnungen, die in Abschnitt 4.6 Bürstensetups näher erläutert werden. Eine schmale Bürstenbreite von 500 mm für den Prüfstand erscheint sinnvoll, da die Prüffläche in der HAW nur 2 m breit ist und somit vier Tests durchgeführt werden können, bevor die Prüffläche neu vorbereitet werden muss.

Um auch kleine Bürstendurchmesser berücksichtigen zu können, muss die Bürstenachse besonders tief liegen können, die daran befestigten Lager und Zahnräder müssen entsprechend klein ausgeführt sein. Eine Herausforderung stellten hier die Steckplätze der Roboterstaubsaugerbürsten dar, deren Bürstendurchmesser etwa zwischen 35 und 50 mm liegen.

4.5 Bürstenadapter

Mit Bürstenadapter sind die Kupplungselemente gemeint, die die Bürsten und Wellenstümpfe verbinden.

Als kleine Bürsten wurden Staubsaugerbürsten des Roborock ausgewählt, die mit vielen Modellen kompatibel sind [15]. Die Bürsten sind mit drei Gummilippen sowie drei Bürstenleisten in keilförmiger Anordnung ausgestattet, siehe Abbildung 4.14.

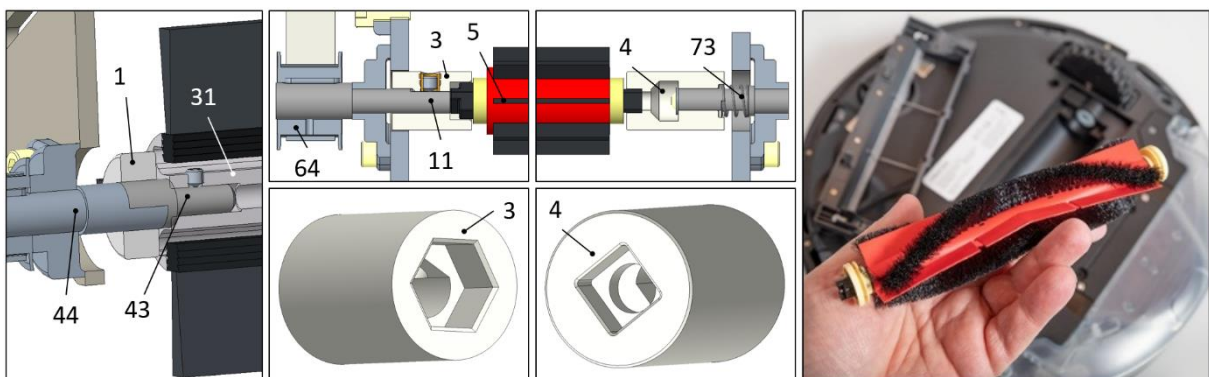


Abbildung 4.14 CAD-Darstellung der Bürstenadapter der großen und kleinen Bürste, Foto der Staubsaugerroboterbürste Roborock [15]

Da die Wellenenden auf der einen Seite mit einem Vierkant und auf der anderen Seite mit einem Sechskant versehen sind, werden die Adapter (3, 4) dementsprechend gestaltet, siehe Abbildung 4.14 Mitte. Der links abgebildete Bürstenadapter (43) ist für die Standardbürste gedacht und wird mit einem Gewindestift axial in der Profilwelle (31) fixiert. Der Bürstenadapter (4) für die kleine Bürste hat auf einer Seite einen Federmechanismus, sodass die Bürste ohne Werkzeuge schnell montiert und demontiert werden kann. Dazu wird der Adapter einfach gegen das Seitenblech geschoben. In Abbildung 4.14 sind oben mittig die Bürstenadapter der kleinen Bürste im Querschnitt dargestellt.

Die Standardbürsten (43) sind über geschlitzte Klemmringe (1) mit den kurzen Wellen (44) verbunden. Zum Herausnehmen der Bürste kann die Schraube am Klemmring (1) gelöst und zur Seite geschoben werden. Eine platzsparende Variante wäre eine zweiteilige Kupplung,

allerdings besteht die Gefahr, dass beim Umrüsten Teile verloren gehen, außerdem ist mit einer längeren Umrüstzeit zu rechnen.

4.6 Bürstensetups

Da die Adaptivität des Prüfstandes ein sehr wichtiges Merkmal ist, wurden verschiedene Setups für unterschiedliche Bürstendurchmesser und Längen entwickelt. Sie sind in Tabelle 4.3 aufgeführt.

Setup	Bürstendurchmesser	Bürstenlänge
Große Bürste	100 bis 280 mm	500 mm
Mittlere Bürste	65 bis 150 mm	500 mm
Kleine Bürste	45 bis 70 mm	0 bis 400 mm

Tabelle 4.3 Bürstendurchmesser der Bürstensetups

Aus dem in 3.4.4 beschriebenen vierten Konzept wurde eine weitere Bürstenanordnung entworfen, die sich jedoch noch in der Entwicklung befindet. Sie basiert auf der Anordnung des Bürstensetups der kleinen Bürsten und ist in Anhang C Setup Tellerbürste dargestellt.

Das Bürstensetup der mittleren Bürsten ist die Standardeinstellung und ist in Abbildung 4.15 dargestellt. Die meisten Tests können in dieser Anordnung durchgeführt werden und verfügt über zwei Bürsten, die unabhängig voneinander gesteuert werden können.

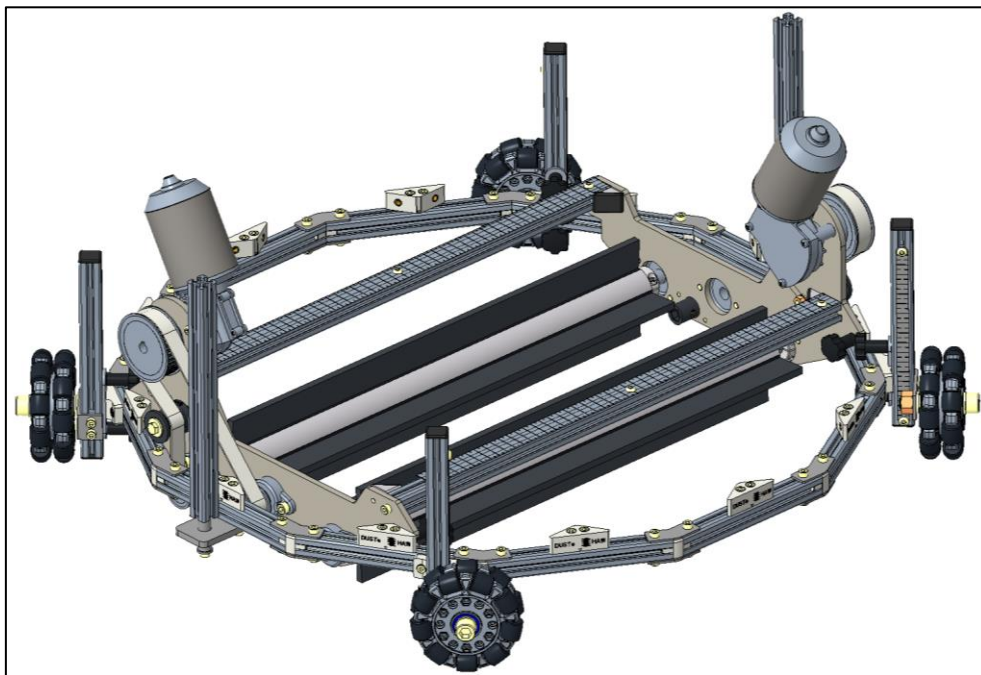


Abbildung 4.15 CAD-Darstellung, Setup mittlere Bürsten

In Abbildung 4.16 ist das Setup für die kleinen Bürsten abgebildet. Es können verschiedene Roboterstaubsaugerbürsten verwendet werden, mit einem Mindestdurchmesser von 45 mm.

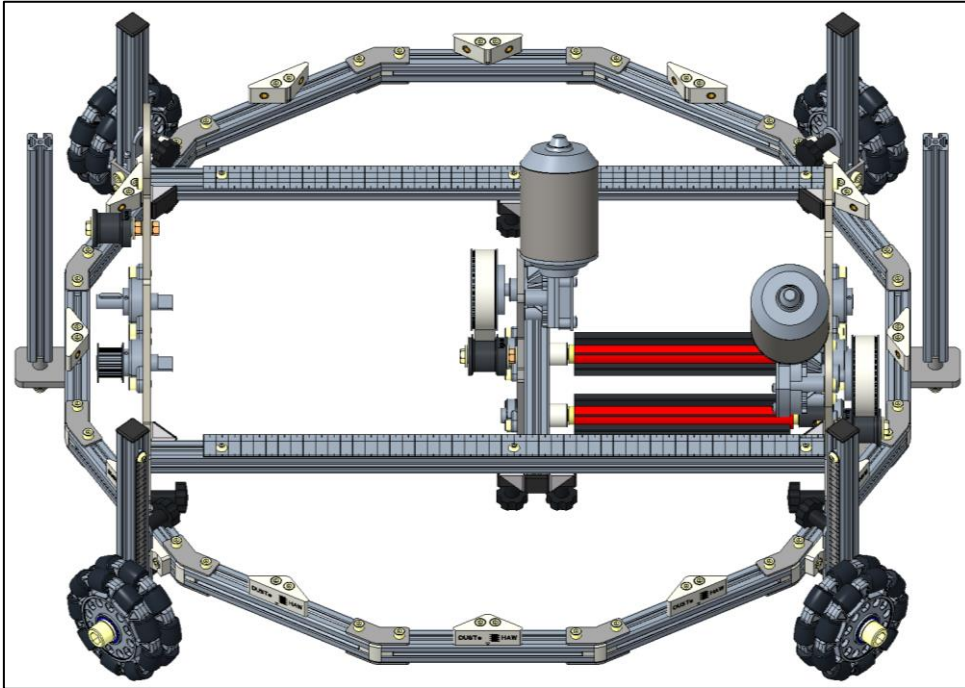


Abbildung 4.16 CAD-Darstellung, Setup kleine Bürsten

Das Setup der großen Bürste ist in Abbildung 4.17 dargestellt. Als Bürste kann eine der Profilwellen aus dem Standardaufbau verwendet, die mit längeren Bürstenleisten ausgestattet ist. Es wird nur Motor 1 angesteuert, Motor 2 kann als Gegengewicht auf der anderen Seite mitgeführt werden.

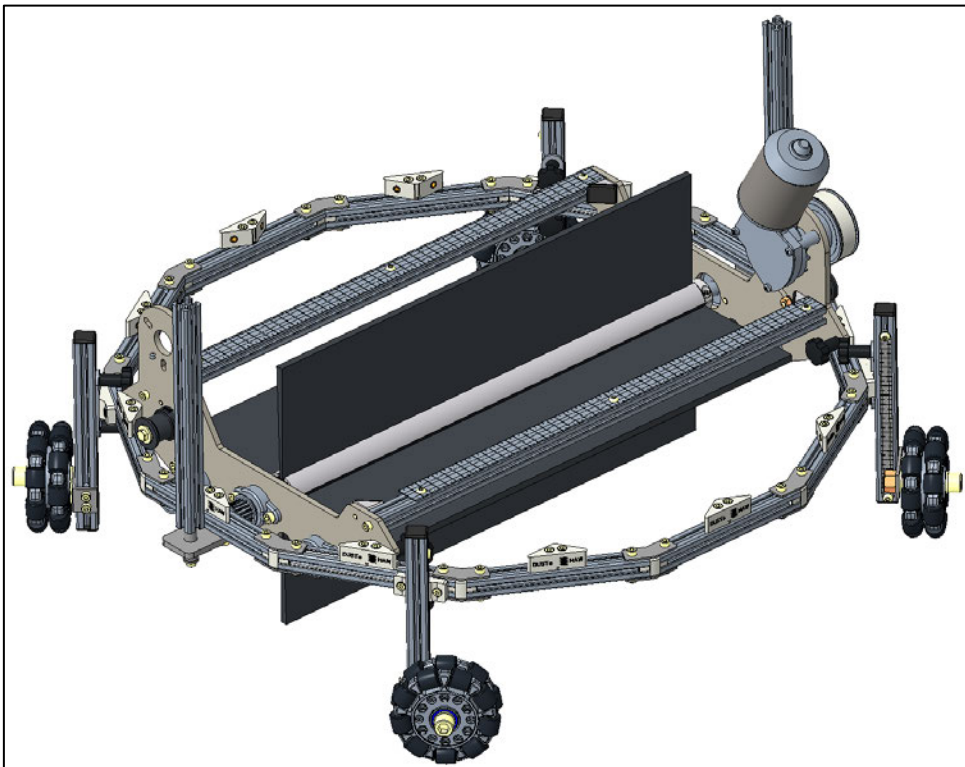


Abbildung 4.17 CAD-Darstellung, Setup große Bürste

5 Fertigung und Montage

Alle Bauteile, die nicht im Handel erhältlich sind, werden je nach Werkstoff in unterschiedlichen Verfahren hergestellt. Die Fertigungszeichnungen sowie die Zusammenbauzeichnung sind im Anhang G Zeichnungen enthalten. Zukaufteile, die nachbearbeitet werden müssen, wie z. B. das Aufbohren der Riemenscheiben und das Einbringen einer Passfedernut, können den CAD-Daten entnommen werden. Für die Kunststoffteile stehen ebenfalls nur die CAD-Daten für die Fertigung zur Verfügung.

5.1 Metallbauteile

Alle Metallteile werden in der zentralen Laborwerkstatt der HAW gefertigt. Die Wellenstümpfe und Wellenadapter werden auf der Drehbank gefertigt und auf der Fräsmaschine nachbearbeitet, um den Halbzylinder und die Passfedernut einzubringen. Die Seiten- und Verbindungsbleche werden mit der Wasserstrahlschneidemaschine aus Blechmaterial mit einer Dicke von 6 mm, 3 mm und 2 mm geschnitten. In Abbildung 5.1 sind in Bild b die frisch geschnittenen Seitenbleche, die Führungsbleche der Z-Führung und in Bild e die Verbindungsbleche dargestellt. Hier müssen nur noch die Kanten gebrochen, Senkbohrungen eingebracht und Gewinde geschnitten werden.

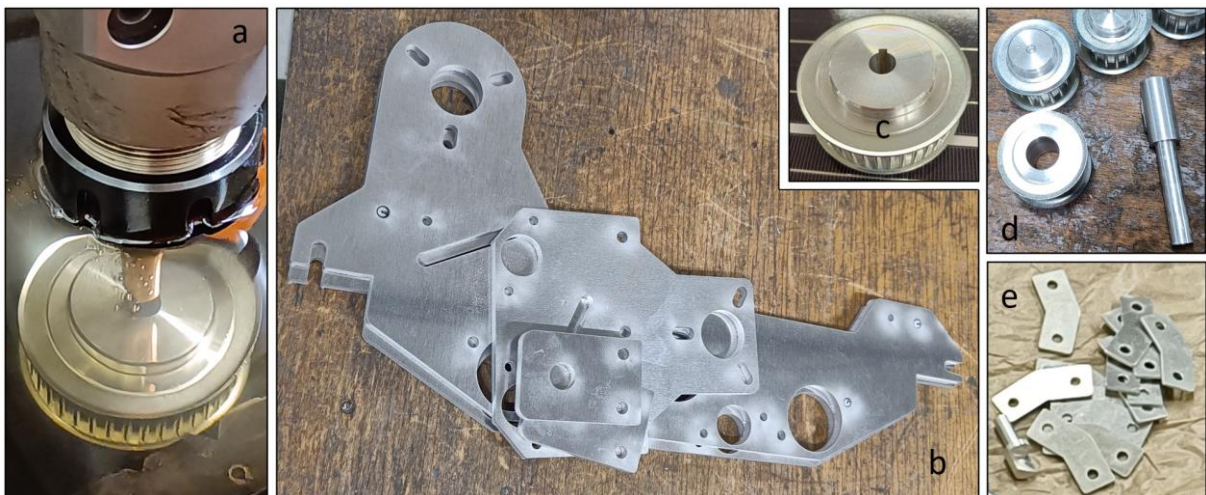


Abbildung 5.1 gefertigte Metallbauteile

Die Passfedernuten der kleinen Riemenscheiben werden durch Zustellen einer Schneide Span für Span abgearbeitet, bis die Nuttiefe erreicht ist.

Für die Herstellung der Passfedernut der großen Riemenscheibe muss ein anderes Verfahren angewendet werden, da es für Wellendurchmesser unter 11 mm kein Werkzeug zur Verfügung steht, die Motorwelle aber 10 mm dick ist. Abbildung 5.1 zeigt in Bild a die große Riemenscheibe beim Erodieren mit einer 3 mm breiten Kupferelektrode. In Bild c ist die fertige Riemenscheibe mit erodierter Nut abgebildet.

Das Fertigungsverfahren Erodieren kann je nach Werkstoff und zu erreichender Oberflächengenauigkeit unterschiedlich lange dauern. Es ermöglicht berührungsfreie Bearbeitung, wobei über Parameter wie die Stromstärke die Geschwindigkeit erhöht werden kann, mit verschlechterter Oberflächengüte. Alle Werkstoffe, unabhängig von ihrer Härte, können bearbeitet werden, sofern sie leitfähig sind.

Aufgrund von Lieferschwierigkeiten wird als Wellenwerkstoff Aluminium verwendet. Da die verwendete Aluminiumlegierung nicht bekannt ist, die Streckgrenze ($R_{p0,2}$) aber unter der von Edelstahl liegt, wird mit einem Wert von 80 MPa gerechnet. Dies entspricht dem Mindestwert für Rundmaterial aus Aluminiumlegierungen nach Roloff/Matek [36]. Der Mindestdurchmesser wird wie bereits in Abschnitt 4.3.2 Wellen berechnet und ergibt 2,6 mm. Damit können die Wellen ohne Anpassungen nach vorhandener Zeichnung gefertigt werden.

5.2 Kunststoffbauteile

Die Herstellung von Kunststoffbauteilen mittels 3D-Druck erfolgt im 3D-Space der HAW mit zwei gängigen Verfahren, dem Fused Deposition Modeling (FDM) und dem Selective Laser Sintering (SLS). Die Auswahl der Verfahren richtet sich nach den spezifischen Anforderungen und Eigenschaften der zu fertigenden Bauteile.

Beim SLS-Verfahren wird feines Pulver schichtweise aufgetragen, und ein Laser verschmilzt die Partikel Schicht für Schicht in der gewünschten Form zu einem Bauteil. SLS ermöglicht die Herstellung präziser Bauteile ohne Stützstrukturen. Das Verfahren bietet zudem eine gute Maßhaltigkeit und eignet sich für Bauteile mit komplexen Geometrien, allerdings sind die Bauteile weniger widerstandsfähig und elastisch. Für die Eckverbinder des Rahmens, die genau in die Nuten der Rahmenprofile passen müssen, aber keinen großen Kräften ausgesetzt sind, bietet SLS eine geeignete Lösung.

FDM-Bauteile werden schichtweise durch geschmolzenes Filament extrudiert. Diese Bauteile sind weniger genau, können aber höheren Belastungen standhalten und brechen nicht sofort. Außerdem ist das FDM-Verfahren schnell und kostengünstig. Mit Ausnahme der Eckverbinder und der Winkelabdeckkappen für die Klemmung der Mittelbalken werden alle Bauteile im FDM-Verfahren hergestellt. Abbildung 5.2 zeigt zwei der hergestellten Kunststoffbauteile, die Rad-Adapter in Bild a und die Winkelanschlätze für das Seitenblech in Bild b. Jeweils wurden die Gewindebuchsen bereits eingesetzt.

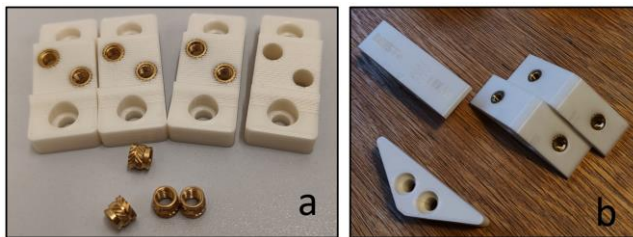


Abbildung 5.2 Kunststoffbauteile

5.3 Durchgeführte Optimierungen

Um den Prototyp in Betrieb nehmen zu können, mussten kleinere Optimierungen vorgenommen werden. Eine dieser Optimierungen bestand darin, die Sterngriffschrauben am Griff etwas anzuschleifen, da sie beim Einschrauben mit dem Rahmenprofil kollidierten. Außerdem wurde das Gewinde auf die passende Größe gekürzt.

Die Wellen der kleinen Bürste wurden um 4 mm gekürzt, damit die Adapterstücke nicht mit der großen Bürste kollidieren und beim Wechsel auf die mittlere oder große Bürste demontiert werden müssen (siehe Anhang D FMEA).

5.4 Montage

Für die Montage des Reinigungsmoduls werden verschiedene Standardwerkzeuge benötigt, wie Innensechskantschlüssel in den Größen SW3, SW4, SW5, SW10 und SW1,5. Um die Räder zu montieren, werden M12 Muttern verwendet, die einen Maulschlüssel der Schlüsselweite SW19 erfordern. Zur Befestigung der Riemenspannräder werden zwei Maulschlüssel SW10 zum Kontern benötigt.

Die Gewindebuchsen werden mit einem LötKolben erhitzt und in die Kunststoffbauteile gefügt.

Zum Fügen der Gleitlagerhülsen in die Riemenspannräder wird ein Schraubstock verwendet. Dieser ermöglicht es die Hülse gleichmäßig in das Kunststoffbauteil zu pressen.

Einstellen der des Reinigungsmoduls

Über die vier Beine lässt sich die Höhe der Bürsten zum Solarpanel einstellen.

Um bereits eine gleichmäßig verteilte Höheneinstellung über die Beine zu ermöglichen, müssen die Winkelverbinder über die Radachsenbohrung zur Unterkante der Beine positioniert werden. Dies ist rechts in Abbildung 5.3 dargestellt. Danach erst und nach fertigem Zusammenbau des Reinigungsmoduls kann die Kalibrierung der Höheneinstellung über die Ausrichtung der Stahllineale an den Beinen erfolgen.

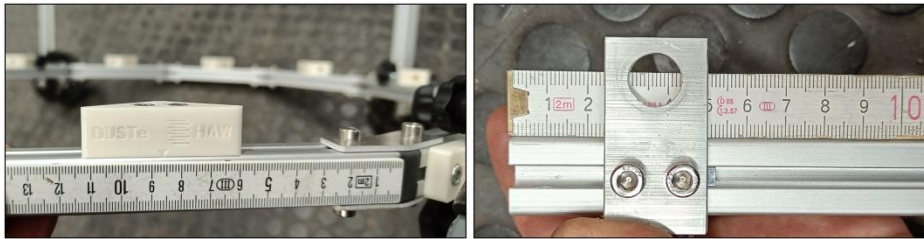


Abbildung 5.3 Positionierung des Winkelanschlages und der Winkelverbinder

Zum Positionieren der Winkelanschlüge wird ein Gliedermaßstab verwendet. Die Pfeile auf dem Winkelanschlage müssen auf beiden Seiten des Item-Profiles mittig liegen, siehe Abbildung 5.3 links, anschließend können die beiden Schrauben festgezogen werden.

Kalibrierung der Höhenverstellung

Zur Kalibrierung der Höhenverstellung muss eine Bürste eingespannt sein. Diese wird auf ihre Nullhöhe eingestellt, d.h. dass sie über die Höhenverstellung gleichmäßig zum Solarpanel ausgerichtet wird und nur noch ein schmaler Lichtspalt zwischen den Borsten und dem Solarpanel sichtbar ist. Danach können die Stahllineale an den Beinen alle auf einen Wert ausgerichtet werden.

Durch die Skala der Höhenverstellung kann eine Überlapptiefe der Bürste zum Solarmodul ermittelt und als Parameter genutzt werden. Dazu muss der Wert der Nullhöhe der Bürste notiert und über den eingestellten Wert berechnet werden.

6 Tests und Validierung

6.1 Funktionstests

Um die gleichen Ergebnisse wie im Funktionstest zu erhalten, muss die Montage wie unter 5.4 Einstellen des Reinigungsmoduls beschrieben durchgeführt worden sein. In Tabelle 6.1 sind die Funktionstests dokumentiert, im Folgenden werden außerdem Besonderheiten in der Bedienung sowie Limitierungen genauer erläutert.

Funktion	Testbeschreibung	erfüllt	Bemerkung
Bewegen auf Solarpanel	- bewegen über 6 PV-Module (2020 x 5140 m) in X und Y - Spalten der PV 20 mm in 45° zu den Rädern	Ja/ bedingt	- Einsatz der kleinen Bürste, mögliche Kollision mit PV (siehe 6.1.1)
wechseln der Bürsten	- Auf- und Abbau Bürstensetup große Bürste	Ja	/
	- Auf- und Abbau Bürstensetup mittlere Bürsten	Ja	/
	- Auf- und Abbau Bürstensetup kleine Bürsten	Ja	/
	- verstellen der Bürstenlänge, kleine Bürste	Ja	- Auf- und Abbau der Mittelbalken
	- Wechseln der Bürstenleiste, mittlere/große Bürste	Ja	- Bürstenleiste neigt zum Abknicken (siehe 6.1.2)
Einstellen der Höhe	Einstellen der Höhe Bürstensetup große Bürste	Test nicht möglich	- keine große Bürste vorhanden - Höhenverstellung funktioniert
	Einstellen der Höhe Bürstensetup mittlere Bürsten	Ja	/
	Einstellen der Höhe Bürstensetup kleine Bürsten	Ja	- Höhenverstellung funktioniert - Riemenscheibe dicht am PV, - Überqueren der Spalten ohne Aufsetzen nicht möglich
Verstellen der Winkel	Bürstenschlitten aus Rahmen heben und an nächster Winkelposition einsetzen	Ja	- Kollision Riemenscheibe mit Rahmen (siehe Abschnitt 6.1.3)
Drehen große Bürsten	- Antreiben der Bürste/n durch Motor - Variieren der Drehzahl am Netzteil durch integriertes Potenziometer - Spannung zwischen 0 und max. 24 V verwenden	Ja	/
Drehen mittlere Bürsten		Ja/Nein	- Lager kleine Bürste außermittig (siehe Abschnitt 6.1.4)
Drehen kleine Bürsten		Ja/Nein	- Sechseckwellenende kann kein Drehmoment übertragen (siehe Abschnitt 6.1.5)
Spannen des Riemens	- Auflegen des Riemens - festspannen mit Riemenspannrad	Ja	Nut in Seitenblech könnte kürzer sein, Kollision der Riemenradschraube mit Innenwinkel (siehe 6.1.6)
Verschieben Mittelbalken	- Lösen, verschieben und festziehen des Mittelbalkens - mit Maßskala positionieren	Ja	Montage/Demontage ungünstig bei Wechsel zwischen kleinen und großen Bürsten

Tabelle 6.1 Funktionstests

6.1.1 Kleine Bürste mögliche Kollision mit PV

Bei Verwendung des Bürstensetups der kleinen Roboterstaubsaugerbürsten liegen die Seitenbleche sehr tief, sodass nur ein Abstand von knapp 5mm Lücke zum Solarpanel verbleibt. In Abbildung 6.1 ist DUSTe für die kleinen Bürsten eingestellt, außerdem ist der sehr schmale Spalt zum Solarpanel zu sehen. Dadurch besteht die Gefahr, dass die Seitenbleche beim Überfahren der Lücken zwischen den Solarmodulen aufsetzen oder an den Befestigungsschrauben hängen bleibt. Es wird daher dringend empfohlen, den Prüfabschnitt vor dem Einsatz der kleinen Bürsten durch manuelles Verschieben des DUSTe sorgfältig auf Kollisionen zu überprüfen.

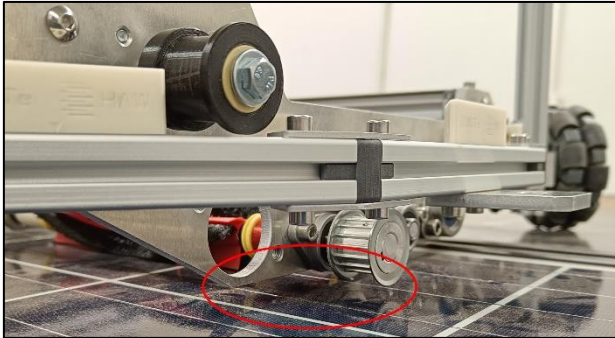


Abbildung 6.1 DUSTe mit eingespannten Roboterstaubsaugerbürsten und kleiner Lücke zum Solarpanel

6.1.2 Wechsel des Bürstenmaterials

Um die Bürstenleisten zu wechseln, muss die Bürste durch Öffnen der seitlichen Kupplungen herausgenommen werden. Die Bürstenleisten können durch seitliches Herausschieben aus der Nut gewechselt werden. Durch die Form der Nut kann es vorkommen, dass die Bürstenleiste in der Nut abknickt, siehe Abbildung 6.2 Bürstenleiste 3 und 4. Daher ist vor der Inbetriebnahme auf guten Sitz der Leisten zu achten. Wird die Bürstenleiste 1 wie in Abbildung 6.2 dargestellt eingeschoben, wird ein sicherer Sitz gewährleistet, allerdings nimmt das Wechseln etwas mehr Zeit in Anspruch, da der Bund fest in der Nut sitzt.

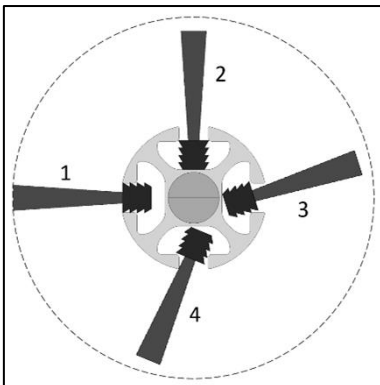


Abbildung 6.2 CAD-Darstellung Bürstenleistensitz in Rundprofilnut

6.1.3 Kollision Riemenscheibe mit Rahmen

Die Winkelverbindungen des Rahmens sind leicht flexibel, das kann das Herausnehmen des Bürstenschlittens vereinfacht, da die Zahnräder leicht über den Rahmen ragen, siehe Abbildung 6.3.

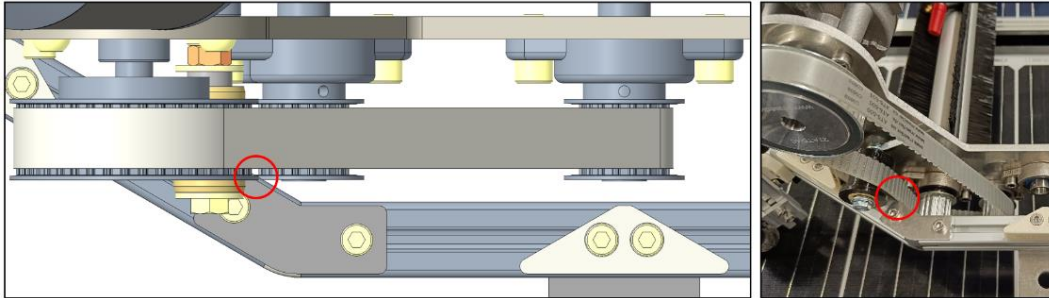


Abbildung 6.3 CAD-Darstellung, Kollision Riemen und Riemenscheibe mit Rahmen

Bei der Befestigung des Bürstenschlittens im Rahmen wird automatisch der Eckenwinkel durch den starren Aufbau des Bürstenschlittens wieder hergestellt. Im rechten Bild ist zu erkennen, dass der Riemen sehr dicht am Rahmen verläuft, im Betrieb ist zu prüfen, ob dies zu Einschränkungen führt.

6.1.4 Winkelverschiebung der Stehlager

Flanschlager haben einen Gehäuseflansch, in dem das Lager sitzt. Die Mantelfläche des Lagers ist ballig, wodurch eine automatische Achswinkelkorrektur der Welle erfolgt. In den meisten Fällen ist dies von Vorteil, denn dadurch kann eine Positionsabweichung des Lagers ausgeglichen werden. Eine automatische Winkelkorrektur ist jedoch ungünstig, wenn keine Bürste eingespannt ist, da die Welle dann einseitig gelagert ist und die Welle durch die RiemenSpannkraft ausgelenkt wird. Die RiemenSpannkraft bewirkt eine Winkelverschiebung der Welle, siehe Abbildung 6.4.

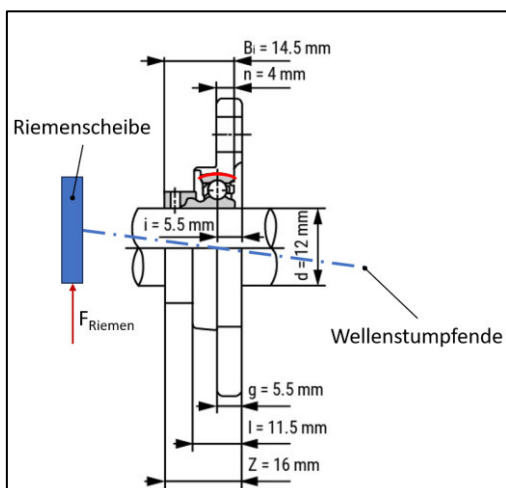


Abbildung 6.4 Skizze des Stehlagers SS KFL001 mit Winkelverzug, in Anlehnung an [27]

6.1.5 Drehmomentübertragung kleine Bürste

Die ausgewählte Roboterstaubsaugerbürste ist auf der einen Seite mit einem Vierkant als Wellenende zur Drehmomentübertragung und auf der anderen Seite mit integrierter Lagerung und Sechskantform des Wellenendes ausgestattet. Dies hat zur Folge, dass aufgrund der Konstruktion des DUSTe eine der Bürsten nicht angetrieben wird, da sich der Antrieb auf der Lagerseite befindet. Als Optimierung wird die Form der Kupplungsenden beider Adapter angepasst, sodass die Bürste gedreht werden kann.

6.1.6 Kollision Riemenspannradschraube

In Abbildung 6.5 ist mittig die Rückseite des Seitenblechs zu erkennen, in dem das Riemenspannrand in der Nut befestigt wird. Die Winkelbefestigung am Rahmen des Bürstenschlittens liegt sehr dicht an dieser Nut, wodurch das Riemenspannrad nicht in den unteren Teil der Nut verschoben werden kann.

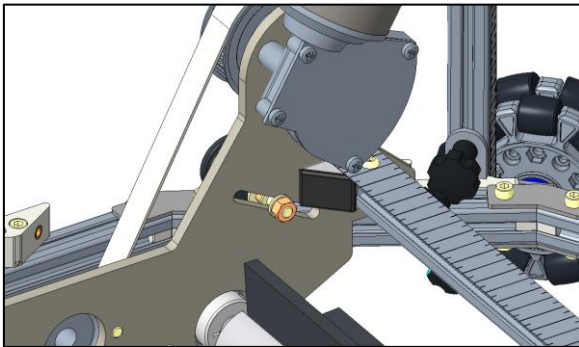


Abbildung 6.5 CAD-Darstellung, Kollision Riemenspannradschraube

Die Funktion ist jedoch nicht eingeschränkt, da sich die Position sowohl beim Riemenwechsel als auch bei gespanntem Riemen oberhalb der Kollisionsstelle befindet.

6.2 Validierung

Nach dem Zusammenbau des DUSTe werden die Anforderungen an das Reinigungsmodul validiert. In Tabelle 6.2 sind die Anforderungen, die bereits überprüfbar sind, aufgelistet und der Erfüllungsgrad angegeben. In Zeile 2.3 ist die Wunschanforderung einer weiteren Bürstenanordnung aufgeführt, ein Konzept dazu ist im Anhang C unter Setup Tellerbürste aufgeführt.

Der Bürstendurchmesser in Zeile 3.3 kann durch die Form der Motoren nur maximal 280 mm betragen, ob dies eine Einschränkung ist, ist noch zu untersuchen, es scheint allerdings vernachlässigbar.

Das Gewicht des Reinigungsmoduls in Zeile 3.4 sollte unter 50 kg liegen, diese Anforderung konnte leicht erfüllt werden, da DUSTe nur etwa 15 kg wiegt.

Insgesamt konnten die meisten Anforderungen erfüllt werden.

Nr.	Anforderung	Zahlenwert / Ausprägung	Forderung / Wunsch	erfüllt
2.	Funktionen			
2.1	Höhenverstellung Bürste	In Z-Richtung	F	Ja
2.2	Trockenreinigung	mittels Bürste	F	Ja
2.3	Ausrichtung der Bürsten	normal zum PV	W	Nein
2.4	Winkelverstellung der Bürste	In XY-Ebene	W	Ja
2.5	Auffangen des Staubes		W	Nein
3.	Technische Merkmale			
3.1	Breite Reinigungsmodul	zwischen 500 und 1000 mm	F	Ja
3.2	Bürstenanzahl	2, unabhängig einsetzbar	F	Ja
3.3	Bürstendurchmesser	40 bis 300 mm	F	Nein
3.4	Gewicht	< 50 kg	F	Ja
4.	Leistung der Bürsten			
4.1	Drehzahl	0 bis 500 u/min	F	Ja
4.2	Leistung des Bürstenmotors	etwa 50 W	F	Ja
5.	Materialien			
5.1	korrosionsbeständig		F	Ja
5.2	leichte Materialien		W	Ja
6.	Kosten			
6.1	Gesamtkosten	1.000 €	F	Ja
7.	Fertigung und Montage			
7.1	Montier- und Demontierbarkeit	mit Standardwerkzeugen	F	Ja
7.2	Wechsel der Bürsten	Einfach, wenige Handgriffe	F	Ja
7.3	Ändern von Parametern	in wenigen Schritten	W	Ja
8.	Einsatz und Instandhaltung			
8.1	Wartungsfreundlich	zugänglich, geringer Aufwand	W	Ja
8.2	Ersatzteile	Verfügbarkeit, einfache Fertigung	W	Ja

Tabelle 6.2 Anforderungsliste DUSTe mit Validierung

6.3 Empfohlene Optimierungen

In Tabelle 6.3 sind Optimierungen aufgeführt, die helfen, die Funktion des DUSTe im Betrieb sicherzustellen. Anschließend werden die Optimierungen genauer beschrieben.

Bauteil	Optimierung	Kommentar
Flanschlager	- Austausch Flanschlager - Einseitig ohne Selbstausrichtung	Anhang D FMEA Zeile 17 und 22
Bürstensetup Tellerbürste	Ausarbeiten des Konzepts des Bürstensetups	Anhang C Setup Tellerbürste
Seitenblech / Riemenscheiben	- Seitenblech als niedrigsten Punkt (momentan Riemenscheibe) - Sicheres Abstellen des Bürstenschlittens - Tiefste Punkte mit Kunststoffabdeckung, Aufsetzen auf PV	
Montagestand	- Aufbock-Möglichkeit des DUSTe - einfaches Wechseln der Bürsten und Einstellen der Höhe	

Tabelle 6.3 empfohlene Optimierungen

Wie in 6.1.4 Winkelverschiebung der Stehlager beschrieben, ist die derzeitige Lösung sehr fehleranfällig und wird sich mit zunehmend Benutzung verschlechtern. Aus diesem Grund sollte eine Optimierung der Lagerung durchgeführt werden. Betroffen sind nur die Lager, an denen die angetriebenen Wellenstümpfe (9, 44) mit Riemenscheiben angebracht sind, siehe Abbildung 6.6.

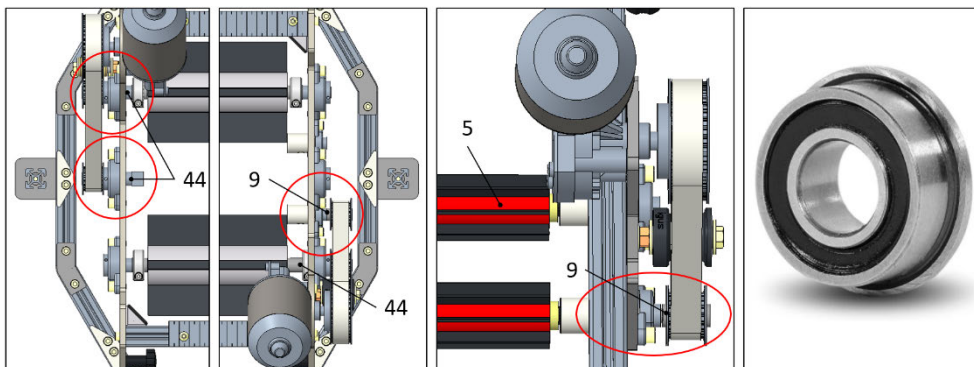


Abbildung 6.6 CAD-Darstellung der auszutauschenden Wellen und Lager, Flanschlager F608 2RS 8 x 22 x 7 [23]

Bei der Auswahl der Lager ist darauf zu achten, dass sie nicht selbst ausrichtend sind. Als Beispiel können die rechts abgebildeten „Miniatur Flanschkugellager F608 2RS 8 x 22 x 7 mm“, verwendet werden. Diese müssten in die Seitenbleche eingepasst werden und mit einem Spannblech daran befestigt werden. Außerdem muss die Wellenkontur so angepasst werden, dass sie eine Nut für Sicherungsringe gegen axiales Verschieben erhalten, da die axiale Sicherung zuvor über die Flanschlager mittels Klemmung am Lagerbund möglich war.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Reinigungsmoduls für einen Prüfstand zur Trockenreinigung von Solarmodulen. Mit diesem soll es möglich sein, eine Lösung zur effizienten Reinigung von Wüstenstaub zu ermitteln, die ohne den Verbrauch von Wasser auskommt.

Zur Untersuchung der realen Bedingungen wurde eine Staubprobe von Solarmodulen aus dem Senegal genommen und die Korngröße bestimmt.

Das Reinigungsmodul wurde mit gängigen Methoden entwickelt. Mit einer Vergleichsanalyse verschiedener Solarreinigern konnten wichtige Parameter ermittelt werden. Für die Konzepterstellung wurde der morphologische Kasten verwendet.

Das entwickelte Reinigungsmodul mit dem Namen DUSTe erlaubt die Variation verschiedener Reinigungsmaterialien, Bürstenausrichtungen und Betriebsparameter. Außerdem konnte die Funktion des Prototyps erfolgreich verifiziert werden.

Vor der Inbetriebnahme sind noch einzelne Optimierungen notwendig und die vollständige Erprobung des Prüfstandes mit der Bedienung über die Benutzeroberfläche sowie die Führung des Reinigungsmoduls im Portalrahmen stehen noch aus.

7.2 Ausblick

Im Folgenden werden mögliche weitere Schritte diskutiert, die sich sowohl auf die Inbetriebnahme des Prüfstandes als auch auf eine genauere Untersuchung der Randbedingungen beziehen.

Bürsten und Materialien

Es gibt noch viele Möglichkeiten, verschiedene Bürsten zu testen. Zum Beispiel über das Material, die Form, den Härtegrad der Borsten oder auch über die Beschaffenheit von Gewebe oder Gummimaterial. So könnte untersucht werden, ob es sinnvoll ist, ein Material zu wählen, in dem sich der Staub ablagert oder eines, das eher staubabweisend ist.

Vergleichssand

Um eine Aussage über die Reinigungsleistung treffen zu können, sollte ein Vergleichssand oder ausreichend Probenmaterial zur Verfügung stehen. Es müsste also eine Möglichkeit gefunden werden, den Staub zu beurteilen, z. B. anhand der Korngröße und Korngrößenverteilung, der stofflichen Zusammensetzung, oder auch der Kornform, da scharfkantige Körner stärker abrasiv wirken und somit die Testergebnisse verfälschen könnten.

Verteilen des Staubes

Es sollte eine Möglichkeit gefunden werden, den Staub gleichmäßig auf den Solarmodulen zu verteilen und gleichzeitig eine Haftung wie unter realen Bedingungen zu erreichen. Vielversprechend erscheint die Verwendung von Methanol anstatt Wasser, zur Verkürzung der Trocknungszeit [1].

Messen der Verschmutzung

Die Kontrolle des Reinigungsergebnisses könnte durch Messung des Verschmutzungsgrades erfolgen, z.B. in Anlehnung an das Messgerät von R. Hamo [7]. Dazu könnte ein Messgerät jeweils vor und hinter der Bürste des Reinigungsmoduls angebracht werden.

Inbetriebnahme des Prüfstands

Die Inbetriebnahme des Prüfstandes und die Erprobung verschiedener Versuchsparameter stehen noch aus. Dies beinhaltet den Gesamtaufbau mit allen Prüfstandkomponenten, die von den Studierenden im Kurs MDesign entwickelt wurden, sowie die Kopplung mit dem Reinigungsmodul DUSTe.

Vergleich der Testung

Das PI Berlin führt zahlreiche Tests an Solarmodulen durch und einzelne Solarreiniger wurden vom PI Berlin zertifiziert. Daher wäre es aufschlussreich zu erfahren, wie diese Tests durchgeführt werden, um daraus Erkenntnisse für die Versuchsplanung mit dem Prüfstand zu sammeln.

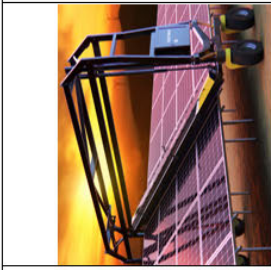
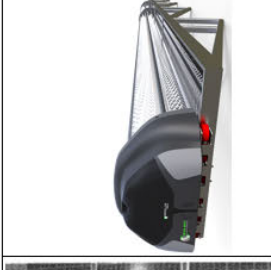
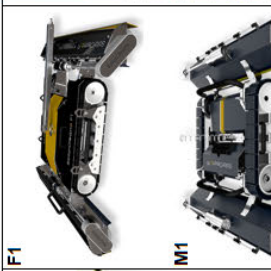
Literaturverzeichnis

- [1] Al Shehri A. et al.: Accelerated testbed for studying the wear, optical and electrical characteristics of dry cleaned PV solar panels. Solar Energy, 2017 (146), p. 8–19.
- [2] Alvarez D. L. et al.: Estimation of an Optimal PV Panel Cleaning Strategy Based on Both Annual Radiation Profile and Module Degradation. IEEE Access, 8 2020, p. 63832–63839. doi:10.1109/ACCESS.2020.2983322.
- [3] Anderson M. et al.: Robotic Device for Cleaning photovoltaic panel arrays.
- [4] Di Sun; Böhringer K. F.: An active self-cleaning surface system for photovoltaic modules using anisotropic ratchet conveyors and mechanical vibration. Microsyst Nanoeng, (1) 2020, p. 87. doi:10.1038/s41378-020-00197-z.
- [5] DIN 6885-1: Mitnehmerverbindungen ohne Anzug, Passfedern, Nuten – Hohe Form. Teil 1: Maße, Toleranzen, Masse 2021.
- [6] DIN ISO-Norm 14688: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden. Teil 1, Nov. 2020.
- [7] Hamo R. I.: Entwicklung eines Überwachungssystems zur Erfassung des Verschmutzungsgrades von Solarmodulen mittels einfacher Sensoren und Mikrocontroller 2023.
- [8] Jaradat M. A. et al.: A fully portable robot system for cleaning solar panels 2015.
- [9] Kazem H. A. et al.: A review of dust accumulation and cleaning methods for solar photovoltaic systems. Journal of Cleaner Production, 276 2020, p. 123187. doi:10.1016/j.jclepro.2020.123187.
- [10] Levitan D.: Is Anything Stopping a Truly Massive Build-Out of Desert Solar Power? 2013, 1 Juli 2013. "<https://www.scientificamerican.com/article/challenges-for-desert-solar-power/>", Abruf am 24.02.2024.
- [11] Nicolas: Arten von Solarmodulen: Die Unterschiede bezüglich Leistung, Effizienz & Kosten. "<https://solaranlage-mit-speicher.de/photovoltaik/arten-von-solarmodulen/>", Abruf am 25.02.2024.
- [12] O. Verf.: SKF. Eignung von Wälzlagern für Industrieanwendungen.
- [13] O. Verf.: Vibration tech for self-cleaning solar panels. "<https://www.pv-magazine.com/2020/04/21/vibration-tech-for-self-cleaning-solar-panels/>", Abruf am 20.02.2024.
- [14] O. Verf.: Q.Power G5 270 Solar Panel Review | Nectr Solar. "<https://solar.nectr.com.au/blog/q-power-g5-270-solar-panel-review#h-what-is-the-q-power-g5-270-solar-panel>", Abruf am 13.02.2024.
- [15] O. Verf.: Roborock S6 MaxV. Tests, Daten und Videos zum Saugroboter. "<https://www.akku-und-roboter-staubsauger.de/saugroboter/roborock-s6-maxv-test-daten/>", Abruf am 16.02.2024.
- [16] O. Verf.: Sand. "<https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/s/sand>", Abruf am 23.09.2023.

- [17] O. Verf.: hyCLEANER® solarROBOT pro. Cleaning of PV systems.
"https://hycleaner.de/en/products-solar-solarrobot-pro/", Abruf am 14.02.2024.
- [18] O. Verf.: Solar Panel Cleaning Technologies | Hekabot.
"https://hekabot.com/technology/", Abruf am 20.02.2024.
- [19] O. Verf.: Korngröße. Äquivalentdurchmesser.
"https://www.biancahoegel.de/wissen/mineral/korngroesse.html", Abruf am 09.02.2024.
- [20] O. Verf.: MÄDLER - Tools. "https://tools.maedler.de/maedlertools/", Abruf am 20.12.2023.
- [21] O. Verf.: SolarCleano B1, F1, M1. "https://solarcleano.com/de/products/solar-reinigungsroboter-f1; https://solarcleano.com/de/products/mini-solarmodul-reinigungsroboter-m1; https://solarcleano.com/files/products/1689777272_Solarcleano-B1-Datasheet-Metrics-EN.pdf", Abruf am 11.02.2024.
- [22] O. Verf.: Ecoppia's Solar Panel Cleaning Robot System Maintenance for O&M.
"https://www.ecoppia.com/technology;
https://www.ecoppia.com/warehouse/temp/ecoppia/E4_Product_Overview.pdf", Abruf am 14.02.2024.
- [23] O. Verf.: Flansch Miniaturlager F-608-2RS. "https://www.kugellager-express.de/miniatur-flanschkugellager-f-608-2rs-8x22x7-mm", Abruf am 14.02.2024.
- [24] O. Verf.: GEVA-BOT. Patroller Robots, Telescope Patroller. "https://www.geva-bot.com/patroller-robots; https://www.geva-bot.com/telescope-patroller;", Abruf am 14.02.2024.
- [25] O. Verf.: How to Measure Gloss using a Gloss Meter.
"https://www.elcometer.com/en/how-to-measure-gloss-using-a-gloss-meter", Abruf am 14.02.2024.
- [26] O. Verf.: MULTIFIT 2022. Intelligent Solar panel cleaning robot Dry/water cleaning automatic with remote control for solar farm system.
"https://de.aliexpress.com/item/1005005046979701.html?src=google&aff_fcid=eb979b6144c74634a3f000dbac47e513-1696340944561-02143-
UneMJZVf&aff_fsk=UneMJZVf&aff_platform=aaf&sk=UneMJZVf&aff_trace_key=eb979b6144c74634a3f000dbac47e513-1696340944561-02143-
UneMJZVf&terminal_id=5d29a35bc91c4c03aa50038c0824e356&afSmartRedirect=y", Abruf am 14.02.2024.
- [27] O. Verf.: Solar reinigungs roboter b12.
"https://de.aliexpress.com/item/1005005675752961.html?spm=a2g0o.detail.0.0.fc527468cfsXLj&gps-id=pcDetailTopMoreOtherSeller&scm=1007.40000.327270.0&scm_id=1007.40000.327270.0&scm-url=1007.40000.327270.0&pvid=037f957c-6f34-45f0-83e2-f3d22afdfe4f&t=gps-id:pcDetailTopMoreOtherSeller,scm-url:1007.40000.327270.0,pvid:037f957c-6f34-45f0-83e2-f3d22afdfe4f,ttp_buckets:668%232846%238109%231935&pdp_npi=4%40dis%21EUR%211461.74%211461.74%21%21%211494.93%21%21%40211b443e1696340937437

- 5248e9262%2112000033978117426%21rec%21DE%21%21AB", Abruf am 14.02.2024.
- [28] O. Verf.: Our Solution | RST CleanTech. "<https://www.rst-cleantech.com/our-solution>", Abruf am 20.02.2024.
- [29] Parsons A. J; Abrahams A. D.: Geomorphology of Desert Environments. 2009.
- [30] Randow M.: Entwicklung, Konstruktion und Montage einer Trockenreinigungsbaugruppe für die vollflächige Reinigung von Solarmodulen.
- [31] Röhrlich D.: Bauen mit Wüstensand. Die Rundung der Körner ist nicht das Problem. "<https://www.deutschlandfunk.de/bauen-mit-wuestensand-die-rundung-der-koerner-ist-nicht-das-100.html>", Abruf am 18.02.2024.
- [32] Schlosser K.: Kurt Schlosser Reinigungsgeräte. "<https://www.kurt-schlosser.de/home/>", Abruf am 14.02.2024.
- [33] Takoulev J. M.: SENEGAL: The Diass solar power plant (23 MWp) officially comes into service. Afrik 21 2022, 27 Mai 2022. "<https://www.afrik21.africa/en/senegal-the-diass-solar-power-plant-23-mwp-officially-comes-into-service/>", Abruf am 10.02.2024.
- [34] VDI 2225 Blatt 3: Konstruktionsmethodik; Technisch-wirtschaftliches Konstruieren; Technisch-wirtschaftliche Bewertung 1998.
- [35] VDI/VDE 2206: Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme 2021.
- [36] Wittel H. et al.: Roloff/Matek Maschinenelemente. Normung, Berechnung, Gestaltung. 24. Aufl. 2019.

A Vergleichsübersicht Solarreiniger

					
Name	B1	PVCleaner Robot V1.0	Dry Patroller GEVA-BOT	Telescope Patroller GEVA-BOT	F1 / M1
Hersteller	SolarCleano	/	/	/	SolarCleano
Jahr	/	2009	/	/	/
Land	Luxembourg	USA / Türkei	Israel, Verkauf Weltweit	Israel, Verkauf Weltweit	Luxembourg
Art der Reinigung	mechanisch automatisiert trocken und nass (7-12 L/min)	mechanisch automatisiert Nassreinigung (0,58l/m ²)	mechanisch automatisiert trocken und nass (1l/PV-Modul)	mechanisch automatisiert trocken und nass mit Wasser (1l/Panel)	mechanisch automatisiert trocken und nass
Bürstendurchmesser	380mm	geschätzt 120mm	294mm	180mm	170mm
Anzahl und Bürstenart	1 Walzenbürste helikoidal	2 Walzenbürsten	1 Walzenbürste	1 Walzenbürste	2 Walzenbürsten helikoidal Gummilippen vor der Bürste
Bürsten- material	/	Nylon 0,15mm Haardurchmesser Staub, Erde Sägespääne Schlamm (trocken/nass)	"Durable, UV protected unique brush"	"Durable, UV protected unique brush"	weiche Microfaser Elemente
Verschmutzungen	/	in Abhängigkeit zur Verfahrensgeschwindigkeit	alle Arten von Verschmutzungen	alle Arten von Verschmutzungen	Staub
Rotations- geschwindigkeit	120 tr/min		180 Umdrehungen/min	333 Umdrehungen/min	/
Verfahr- geschwindigkeit	40m/min (0,66m/s)	2,33m/min	30m/min (0,33 m/s)	Handbedienung	F1: 40m/min (0,66m/s) M1 30 m/min (0,5 m/s)
Gewicht		zwischen 30 und 40kg	12,5-27kg (1-5m Bürste)	4 kg	F1: 80kg / M1: 37kg
Energieverbrauch		/	/	105 W	F1: 490W / M1: 140W
Besonderheiten Kommentar	geringe Gewichtsbelastung auf Solarpanelen, Abstützung am Boden Winkelanpassung der	Portalrahmenähnlich, 2 Laufkatzen oben und unten entlang der Solarpanelkante	/	/	Bürste berührt nicht! Luftstrom sorgt für Abtransport des Staubes Reinigt beim Abwärtsfahren
Zertifizierung			PI-Berlin	PI-Berlin	PI-Berlin, viele PV Hersteller
Quelle	[21]	[3]	[24]	[24]	[21]
					[22]

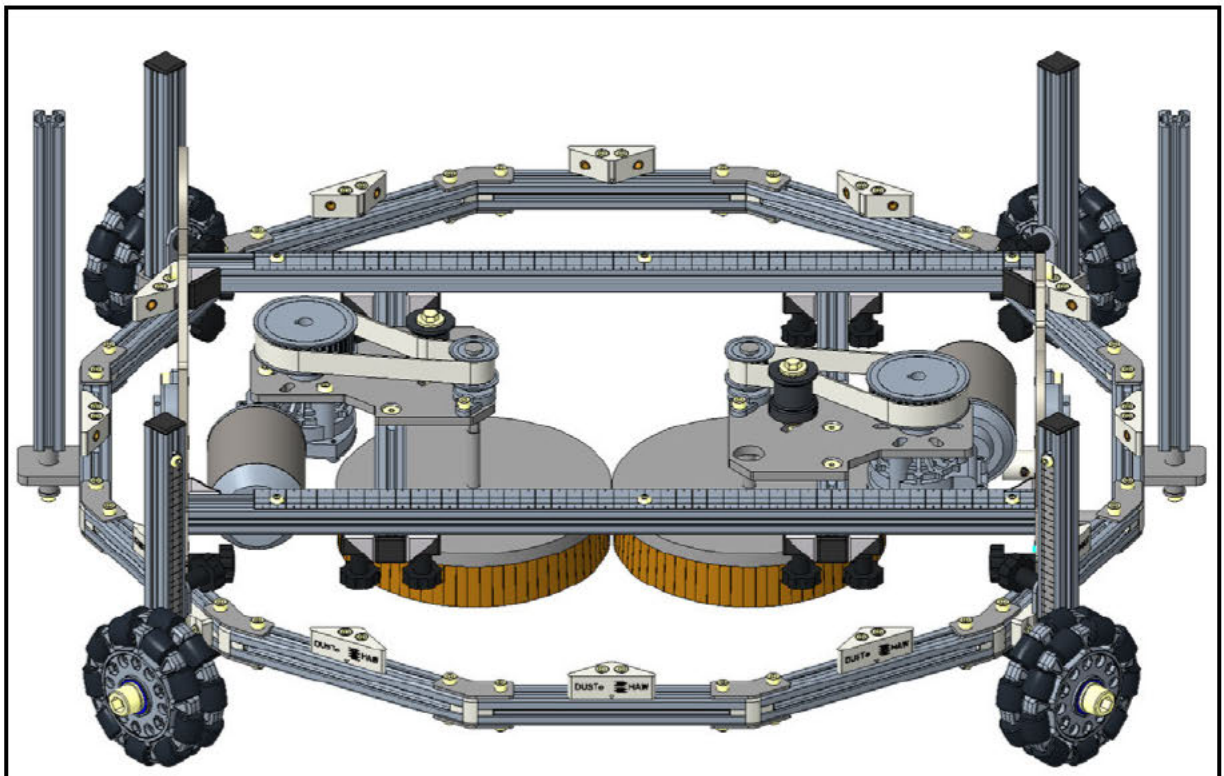
						
Name	/	Ecoppia H4	solarROBOT pro	Schlosser	Multifit 2022	B12
Hersteller	/	Ecoppia	hyCleaner	Helios	Multifit Solar	Ambition
Jahr	2015	/	/	/	/	/
Land	USA / Jordan	Israel, Indien, Chile	Deutschland	Deutschland	China	/
Art der Reinigung	mechanisch automatisiert Trockenreinigung	microfibers and controlled airflow	mechanisch automatisiert trocken und nass (0.5 l/m ²)	mechanisch ferngesteuert trocken und nass	mechanisch ferngesteuert trocken und nass (210- 360l/h)	mechanisch, ferngesteuert Nassreinigung, Wasser oder Chemikalien
Bürstendurchmesse	geschätzt 90mm	/	280mm	geschätzt 100mm	/	130mm
Anzahl und Bürstenart	2 Walzenbürsten	1 Walzenbürste, Helixform	2 Walzenbürsten mit Bürstenlippe außen	2 Walzenbürsten Vibrationsbürsten	Walzenbürste	Walzenbürste
Bürsten- material	/	3 Lagen Microfaser aus Polyester und Polyamide	/	Nylon	/	PVC
Verschmutzungen	Staub Sand	Staub	/	/	/	alle Arten von Verschmutzungen
Rotations- geschwindigkeit	/	/	400 u/min	/	/	400-500 u/min
Verfahr- geschwindigkeit	/	/	36,6m/min (2,2km/h)	15-20 m/min	15-20 m/min	11-12m/min
Gewicht	30-40kg	40-50kg	30 kg	60 kg	23-55kg	37 kg
Energieverbrauch	/	/	150W	150W	150W / 240W	50W
Besonderheiten Kommentar	/	Bürste berührt nicht! Luftstrom transportiert Staub nach unten durch Helixform. Einsatzwinkel auf SP 16°- 35°	Bürsten fahren seitlich aus, Fährt automatisiert, ist an Wasserversorgung angeschlossen	Vibrationsbürsten (patentiert) ferngesteuert angeschlossen an Wasserversorgung	ferngesteuert, Anklemsystem am Oberen- / Unterenden Solarpanele	Bürstenlänge 1700 kann sich auf der Stelle drehen
Zertifizierung		4-Rad-Antrieb Pi-Berlin				
Quelle	[7]	[22]	[17]	[32]	[26]	[27]

B Anforderungsliste

Nr.	Anforderung	Zahlenwert / Ausprägung	Forderung/ Wunsch	erfüllt
1.	Einsatzort / Umgebung / Klima			
1.1	Senegal, Solarfeld Diass	6 x 60m	W	
1.2	Deutschland, HAW Hamburg	5,14 m x 2m	F	
1.3	Windstärken zwischen	15 - 30 km/h	W	
1.4	Temperatur	10° - 50°C	F	
1.5	UV-Beständig	UV-Index 7 im Senegal	F	
1.6	Luftfeuchtigkeit	bis 90%	F	
2.	Funktionale Anforderungen			
2.1	Höhenverstellung Bürste	In Z-Richtung	F	ja
2.2	Trockenreinigung	mittels Bürste	F	ja
2.3	Geschwindigkeiten der Bewegungen in X und Y	einstellbar	F	
2.4	Drehung der Bürsten	mit und gegen den Uhrzeigersinn	F	
2.5	Drehzahl der Bürsten	einstellbar	F	
2.6	Aufnahme von Messdaten		F	
2.7	Auffangen des Staubes		W	nein
2.8	Ausrichtung der Bürsten	parallel zum PV	F	ja
2.9	Ausrichtung der Bürsten	normal zum PV	W	nein
2.10	Winkelverstellung	in XY-Ebene	W	ja
3.	Technische Merkmale			
3.1	Prüfflächenlänge	bis 6060 mm	F	
3.2	Breite Reinigungsmodul	500 bis 1000 mm	F	ja
3.3	Bürstenanzahl	2	F	ja
3.4	Bürstendurchmesser	40 bis 300 mm	F	nein
3.5	Gewicht	< 50 kg	F	ja
4.	Leistung			
4.1	Verfahrgeschwindigkeit Schlitten	0 bis 50 m/min	F	
4.2	Verfahrgeschwindigkeit Schlitten	50 bis 100 m/min	W	
4.3	Verfahrgeschwindigkeit Prüfstand	0 bis 50 m/min	F	
4.4	Verfahrgeschwindigkeit Prüfstand	50 bis 100 m/min	W	
4.5	Drehzahl	0 bis 500 u/min	F	ja
4.6	Leistung des Bürstenmotors	min. 50 W	F	ja
5.	Parameter für den Prüfstand			
5.1	Energieverbrauch	von allen Motoren	F	
5.2	Drehzahl	Bürsten	F	
5.3	Geschwindigkeit	Verfahren in X und Y	F	
5.4	Position	X und Y des Reinigungsschlittens	F	
5.5	Temperatur	Umgebung	F	
5.6	Temperatur	Solarpanel	W	
5.7	Luftfeuchtigkeit	Umgebung	W	
5.8	Anpresskraft der Bürste	N	W	
5.9	Staub auf dem Solarpanel	g/m²	W	

Nr.	Anforderung	Zahlenwert / Ausprägung	Forderung/Wunsch	erfüllt
5.10	Abstand der Mittelachse Bürste zum Panel	in 1 mm Auflösung	F	
5.11	Staubdichte in der Luft		W	
5.12	Windgeschwindigkeit	Umgebung	W	
5.13	Vibrationen	am Solarpanel	W	
6.	Bedienung			
6.1	Zykluseingabe		W	
6.2	Bürstendrehzahl unabhängig voneinander	Bürste 1 und 2; in 10er Schritten	F	
6.3	Eingabe Verfahrensgeschwindigkeit X	0,25 bis 100 m/min	F	
6.4	Eingabe Verfahrensgeschwindigkeit Y	0,25 bis 100 m/min	F	
7.	Sicherheit			
7.1	Notaus		F	
7.2	Absturz verhindern		F	
7.3	Betriebsanleitung		F	
8.	Materialien			
8.1	korrosionsbeständig		F	ja
8.3	leichte Materialien		W	ja
9.	Kosten			
9.1	Kosten Reinigungsmodul	1.000 €	F	ja
10.	Fertigung und Montage			
10.1	Montier- und Demontierbarkeit	Standardwerkzeuge	F	ja
10.2	Wechseln der Bürsten	einfach, wenige Handgriffe	F	ja
10.3	ändern von Parametern	in wenigen Schritten	W	ja
11.	Einsatz und Instandhaltung			
11.1	Wartungsfreundlich	zugänglich, geringer Aufwand	W	ja
11.2	Ersatzteile	Verfügbarkeit, einfache Fertigung	W	ja
11.3	Widerholgenauigkeit	Störgrößen minimieren	F	ja
13.	Termine			
13.1	Abgabedatum M-Design	15.01.2024	F	
13.2	Abgabedatum Bachelorarbeit	05.03.2024	F	
13.3	Teilebestellung	bis 01.12.2023	F	
13.4	Fertigung	ab 15.12.2023	W	
13.5	Montage	ab 01.01.2024	W	
13.6	Tests	ab 15.01.2024	W	

C Setup Tellerbürste



Erweiterte Stückliste

Anzahl	Benennung / Kommentar
2	optimiertes Seitenblech_mitte mit um 60° verschobenen Schraubenlöchern
1	Zahnriemen 3 (375 mm)
2	Adapter zur Kupplung der Bürsten
2	Axiallager
2	Tellerbürsten bis max. 200 mm Durchmesser
	Ggf. etwas zum Auffangen des Staubes, Staubsaugeröffnung/Trichter mittig hinter den Bürsten

FMEA										Produktname		DUSTe		Änderungsstand		29.01.2024	
Design-FMEA										Produktnummer		00001		erstellt durch		Marlene Bartschies	
										Datum		14.12.2023				Seite 2	
Baugruppe	Bauteil	mögliche Fehler / Nr. Fehlfunktion		Fehlerursache	Fehlerfolge	Derzeitiger Zustand				Verbesserter Zustand			Zuständigkeit / Termin		Risikoprioritätszahl		
Bürsten-	Bürsten-schlitten	Rahmen löst sich beim Anheben des Bürstenschlittens		Schrauben wurden nicht festgezogen	Herabfallen des Rahmens, Verletzungsgefahr	Einheken des Seitenblechs unter die Befestigungsschrauben am Rahmen	beim Anheben, Sichtprüfung	6	5	4	Schnellschrauber statt Schrauben verwenden	keine	6	5	4	120	
	Bürstenwelle	13 Materialversagen, Bruch		Belastung nicht korrekt erkannt	Ausfall der Bürste	keine	Sichtprüfung	6	3	7	Edelstahl als Wellenwerkstoff verwenden		6	1	7	42	
	Bürstenleiste	14 löst sich aus Rundprofilnut		Vibrationen, lockerer Sitz der Bürstenleiste, Zentrifugalkraft zu hoch	Reinigungsergebnis nicht reproduzierbar, verfälscht	keine	Sichtprüfung	4	4	7	Positionierleisten seitlich neben Bürstenleiste ins Profil schieben	keine	4	4	7	112	
	Bürste	Beschädigen des Solarpanels beim Reinigen		Bürstenmaterial zu hart, Schleifeffekt durch Sand	zerkratztes Solarpanel	weiche Bürsten / Reinigungsmedien verwenden	Sichtprüfung	7	4	3	Dauerelasts zur Materialabrasion durchführen	keine	7	4	3	84	
	Bürstenwellen-adapter	16 Kollision der Bürste mit Adapter		Adapter ragt in Bereich der Bürste	verfälschte Messergebnisse	Abbauen der Adapter	Sichtprüfung	4	8	5	160	Wellen und Adapter gekürzt	Wellen und Adapter gekürzt	4	2	2	16
Bürste	Flanschlager	17 Außermittige Position der Bürste		Fluchtungsfehler durch Riemenanspannung, hoher Nachgiebigkeit des Stehlagere	Messergebnisse, Riemenanspannung zu gering, Durchrutschen	Geringe Riemenanspannung	Sichtprüfung	6	9	4	216	Verwenden anderer Lager auf Seite des Zahnriemenrades	keine	5	5	4	100
	Bürstenwellen-adapter klein	18 Materialversagen des PLA gedruckten Adapters		Hohe Kräfte, Fertigungsfehler	Bürste dreht sich nicht, bleibt stecken	keine	Sichtprüfung	3	3	3	27	Widerstandsfähigeres Material verwenden	keine	3	3	3	27
	Kupplung	19 Kupplung der Bürste nicht festgezogen		Bürste löst sich aus Befestigung	Beschädigung des Solarpanels durch Metallenden der Bürste	keine	Sichtprüfung	7	3	4	84	Ähnliche Hupplung wie für kleine Bürste mit Spannfeder	keine	7	3	4	84
Antrieb	Motor	20 Beschädigung am Antrieb		Motor zu Stark für Antrieb und Bürste bleibt an Kante von Solarpanel hängen	Beschädigung des Antriebs und des Solarpanels	langsames Hochstellen der Drehzahl	Sichtprüfung	6	3	4	72	Rutschkupplung berücksichtigen	keine	6	3	4	72
	Riemen-scheibe, Motorwelle	21 Kraft wird nicht übertragen		Durchrutschen der Klemmung mittels Madenschraube	Bürste bewegt sich nicht oder stoppt unerwartet	Klemmung zwischen Zahnriemenrad und Welle durch Madenschraube	Sichtprüfung	8	7	5	280	Passfederverbindung, Passfedernut in Welle und Nabe	Passfederverbindung, Passfedernut in Welle und Nabe	8	1	5	40
	Zahnriemen	22 Reißt oder springt ab		zu hohe Kraft auf Riemen / Fluchtungsfehler der Welle durch selbst-ausrichtende Stehlager	Bürste dreht sich nicht	Riemenanspannung nur so hoch wie nötig, eher gering	Sichtprüfung	6	5	4	120	Verwenden anderer Lager auf Seite des Zahnriemenrades	keine	6	5	4	120

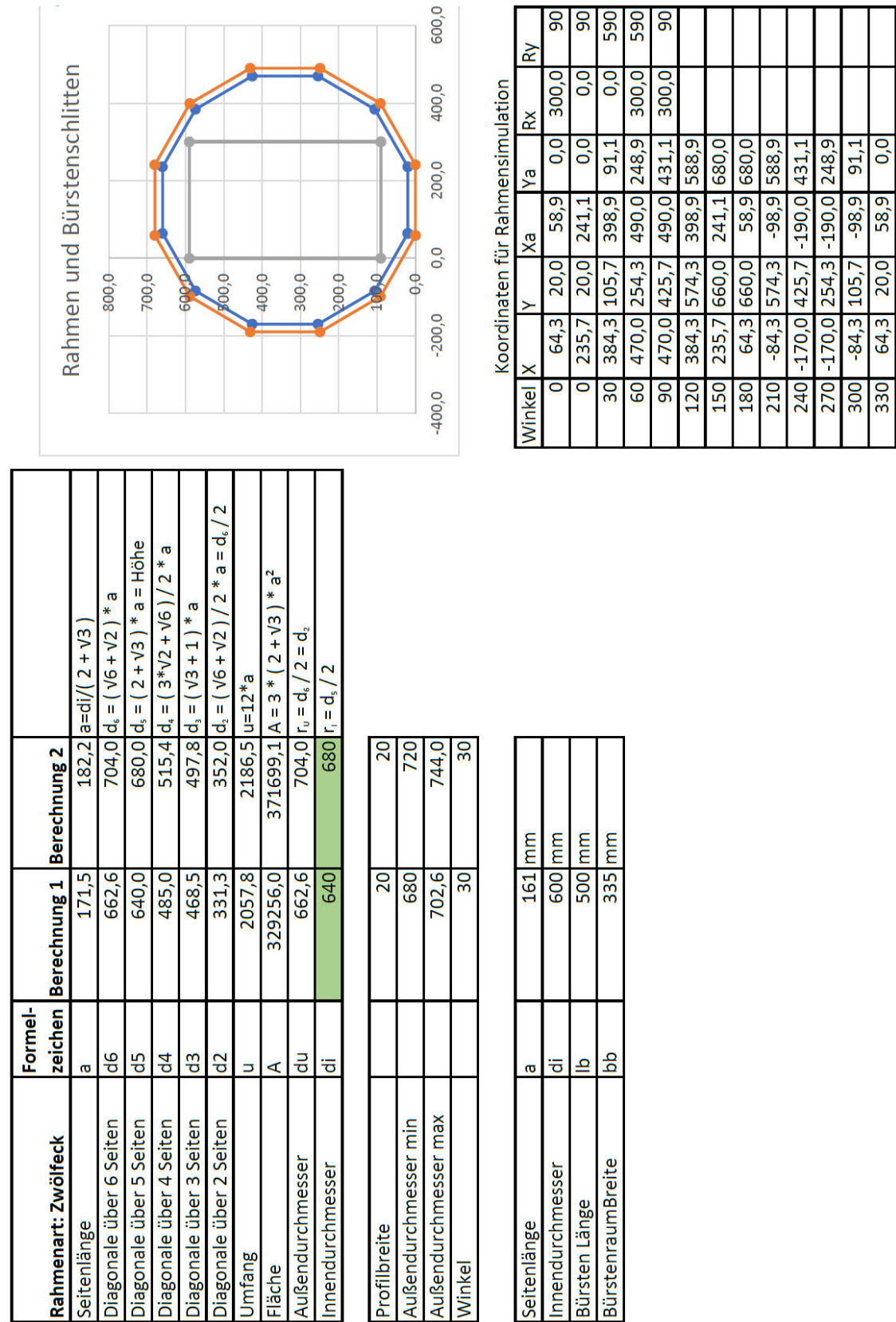
FMEA										Produktname		DUSTe		Änderungsstand		29.01.2024		Seite 3	
										Produktnummer		00001		erstellt durch		Marlene Bartschies			
										Datum		14.12.2023							
Design-FMEA																			
Baugruppe	Bauteil	Nr	mögliche Fehler / Fehlfunktion	Fehlerursache	Fehlerfolge	Derzeitiger Zustand				Verbesserter Zustand				Risikoprioritätszahl					
						Vermeidungs-Maßnahme	Entdeckungs-Maßnahmen	Bedeutung 1-10	Auftreten 1-10	empfohlene Maßnahme	Zuständigkeit / Termin	Bedeutung 1-10	Auftreten 1-10						
Antrieb	Riemen-spannrad	23	Zahnriemen zu locker	Riemenspannrad nicht fest gezogen	Zahnriemen nutzlos durch, keine Drehmomentübertragung an Bürste	keine	Sichtprüfung	5	3	3	Federgespanntes Riemenspannrad	keine	5	3	3	45	RZ		
	Räder / Abstützung	24	Abstürzen des Reinigungsmoduls	Überfahren der Solarpanelkante	Beschädigung des Solarpanels, kann sich nicht selbst wieder hochziehen	Voreinstellung mit Sicherheitsabstand zur Kante	Sichtprüfung	7	3	3	Stopplaster oder Anschlag berücksichtigen	keine	7	3	3	63	63		
DUSTe	Staub	25	Aufwirbeln des Staubes im Betrieb	Staubbelastung in der Luft, hohe Bürstendrehzahlen	Gesundheitsrisiko	geringe Arbeitsrehzahlen wählen, langsam steigern	Sichtprüfung	8	5	4	Abdeckung / Einhausung der Bürste, oder integrierter Staubsauger	keine	8	5	4	160	160		
		26	Ergebnisse im Labor weichen von realen Bedingungen auf Solarfeld ab	Prüfstand wurde nicht Validiert	falsche Annahmen für Solarreinigerentwicklung	Mikroskopieren des Teststaubes aus Diass zum Bestimmen der Korngröße, Vergleich mit Testvideos zur Reinigung Nov./Dez. 2023, Diass		8	4	4	Ermitteln der Zusammensetzung des Staubes, Verfahren zum gleichmäßigen Aufbringen von Staub entwickeln	Tests zum Aufbringen des Staubes mit Wasser oder Alkohol	8	4	3	96	96		

Legende	Auftreten			Bedeutung			Entdeckung		
	Wahrscheinlichkeit des Fehlers (Fehler ist möglich)			des Fehlers (Auswirkung auf den Kunden)			Wahrscheinlichkeit der Entdeckung des Fehlers (vor Auslieferung an Kunden)		
	unwahrscheinlich	1	1	kaum wahrnehmbar	1	hoch	1		
	sehr gering	2-3	2-3	unbedeutender Fehler	2-3	mäßig	2-3		
	gering	4-6	4-6	mäßig schwerer Fehler	4-6	gering	4-6		
	mäßig	7-8	7-8	schwerer Fehler	7-8	sehr gering	7-8		
	hoch	9-10	9-10	äußerst schwerer Fehler	9-10	unwahrscheinlich	9-10		

E Berechnung

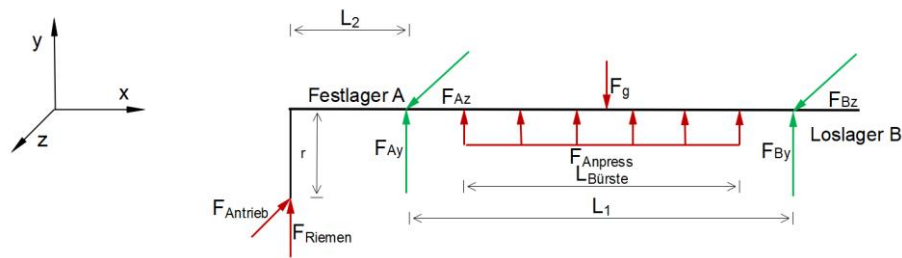
Berechnungen Rahmen

Seitenlänge der Profilstücke und Größe Bürstenschlitten



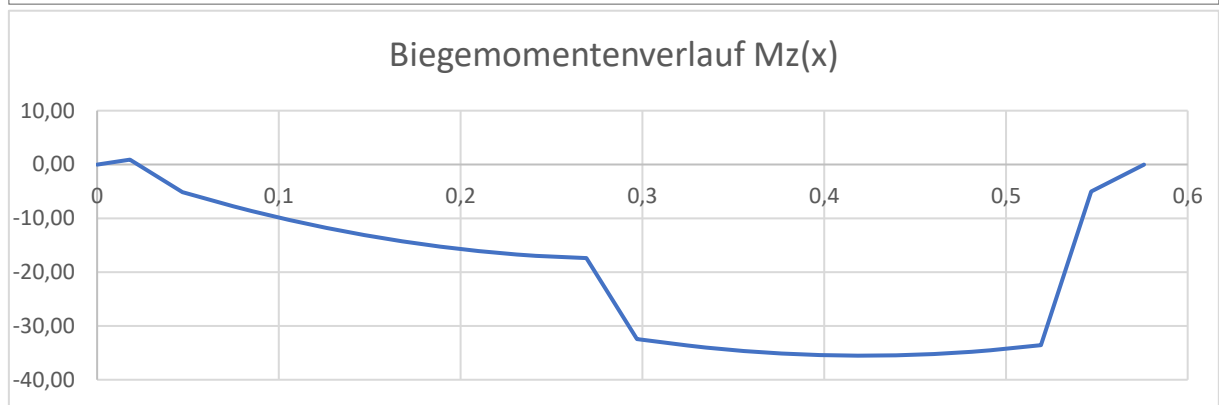
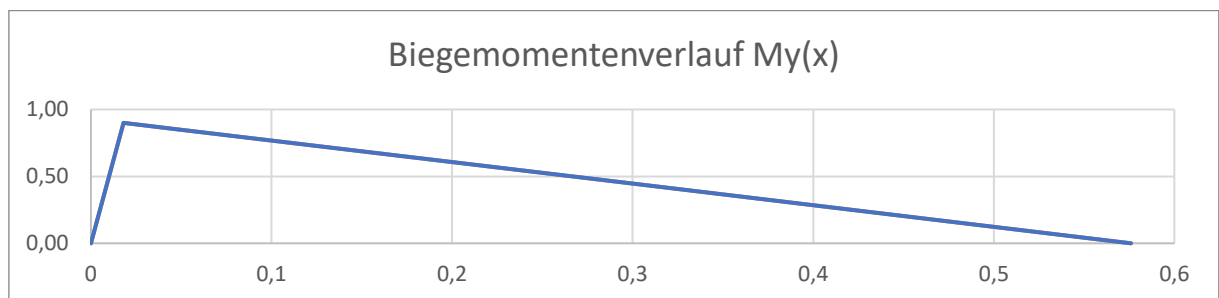
Überschlägiger Wellendurchmesser

Freischnitt



Masse		
Gewicht Item-Welle	m_{iw}	0,735 kg
Gewicht Bürste	$m_{Bü}$	0,500 kg
Gewicht Welle u. Adapter	m_{wa}	0,300 kg
Gesamtgewicht	m_{ges}	1,535 kg
Kräfte und Momente		
Gewichtskraft	F_g	15,1 N
Anpresskraft	$F_{Anpress}$	200,0 N
Antriebskraft	$F_{Antrieb}$	50,0 N
Riemenspannkraft	F_{Riemen}	50,0 N
Antriebsmoment	M_A	1,2 Nm
Streckenlast	q_0	200,0 N
Abmessung		
Lagerabstand	L_1	0,558 m
Bürstenlänge	$L_{Bürste}$	0,500 m
Antrieb zu Lager A	L_2	0,018 m
Radius Riemenzahnrad	r	0,024 m

Sonstiges		
Sicherheit	S	1,5
Wechselfest. Edelstahl	σ_{bwn}	375 MPa
Wechselfest. Aluminium	σ_{bwn}	80 MPa
Ergebnisse		
Lagerkraft A in Y	F_{ay}	-159,1 N
Lagerkraft B in Y	F_{by}	-75,8 N
Lagerkraft A in Z	F_{az}	51,6 N
Lagerkraft B in Z	F_{bz}	-1,6 N
Biegemoment max Z	M_{zmax}	-35,5 Nm
Biegemoment max Y	M_{ymax}	1,2 Nm
Resultierendes Moment	M_{res}	35,5 Nm
Vergleichsmoment	M_v	35,5 Nm
überschlägiger Durchmesser		
Durchmesser Edelstahl	$d_{min, Stahl}$	1,2 mm
Durchmesser Aluminium	$d_{min, Alu}$	2,6 mm

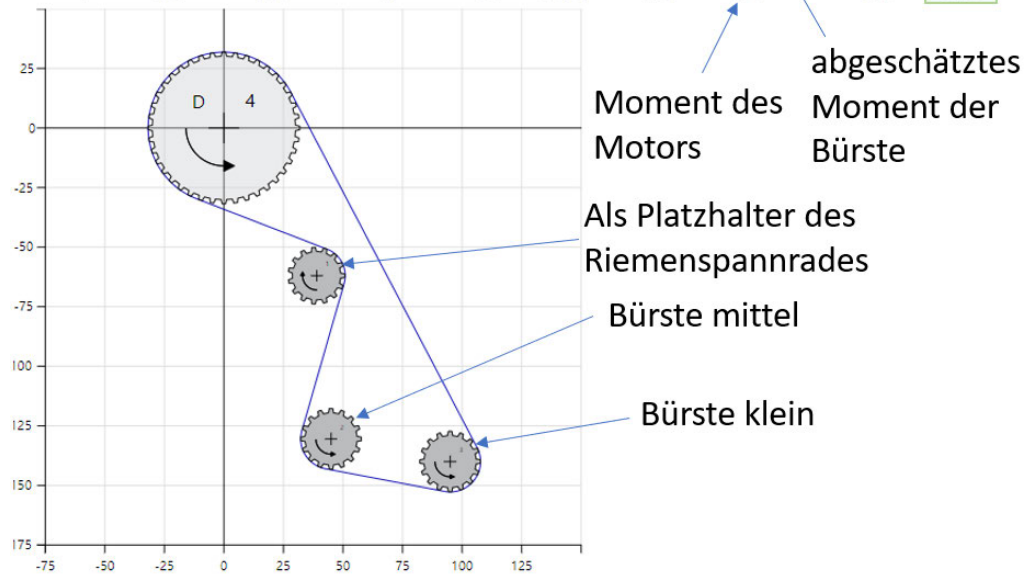


Zahnriemen - Mädlertool

MÄDLER belt drive result details



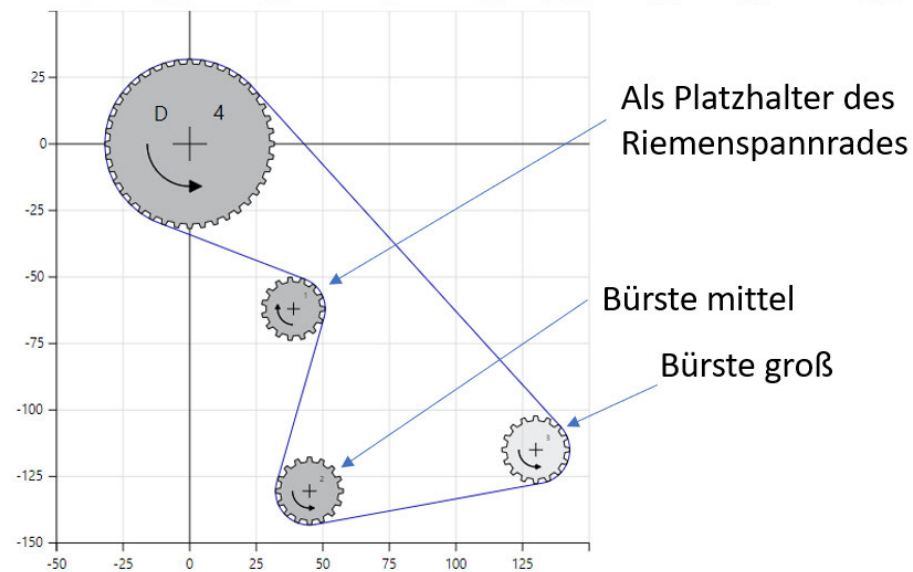
Pulley No.:	x-Position [mm]	y-Position [mm]	Number of teeth	meshing Number of teeth	Speed [1/min]	Power [kW]	Torque [Nm]	transferable Power [kW]	Safety
1	39.00	-62.00	15	3	586.67	0.00	0.00	0.10	∞
2	45.00	-130.50	16	4	550.00	0.05	0.92	0.14	2.65
3	95.00	-140.00	16	5	550.00	0.05	0.92	0.19	3.54
4	0.00	0.00	40	24	220.00	0.03	1.50	0.25	7.15



MÄDLER belt drive result details



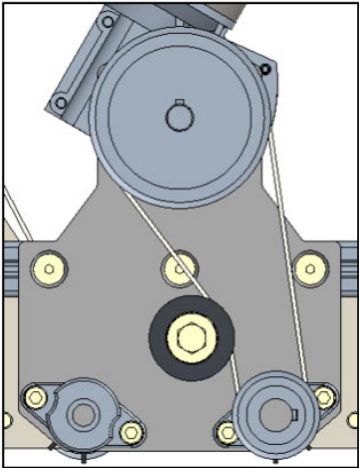
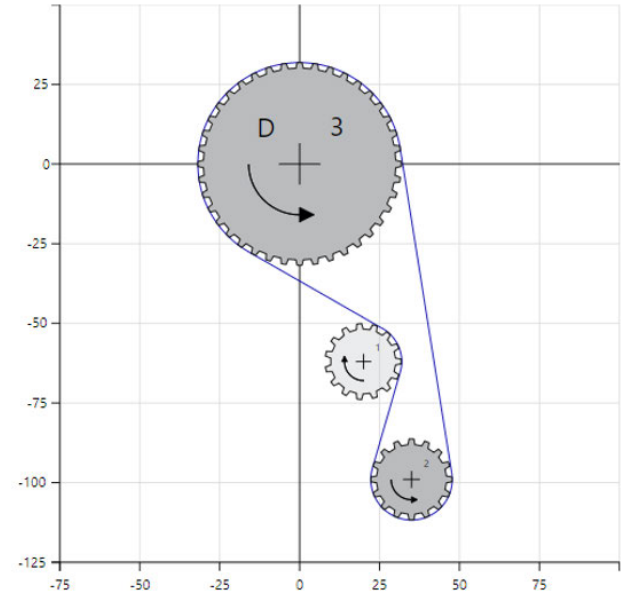
Pulley No.:	x-Position [mm]	y-Position [mm]	Number of teeth	meshing Number of teeth	Speed [1/min]	Power [kW]	Torque [Nm]	transferable Power [kW]	Safety
1	39.00	-62.00	15	3	586.67	0.00	0.00	0.10	∞
2	45.00	-130.50	16	5	550.00	0.05	0.92	0.19	3.54
3	130.00	-115.00	16	5	550.00	0.05	0.92	0.19	3.54
4	0.00	0.00	40	22	220.00	0.03	1.50	0.25	7.15



MÄDLER belt drive result details



Pulley No.:	x-Position [mm]	y-Position [mm]	Number of teeth	meshing Number of teeth	Speed [1/min]	Power [kW]	Torque [Nm]	transferable Power [kW]	Safety
1	20.00	-62.00	15	3	586.67	0.00	0.00	0.10	∞
2	35.00	-99.00	16	9	550.00	0.05	0.92	0.23	4.42
3	0.00	0.00	40	25	220.00	0.03	1.50	0.25	7.15

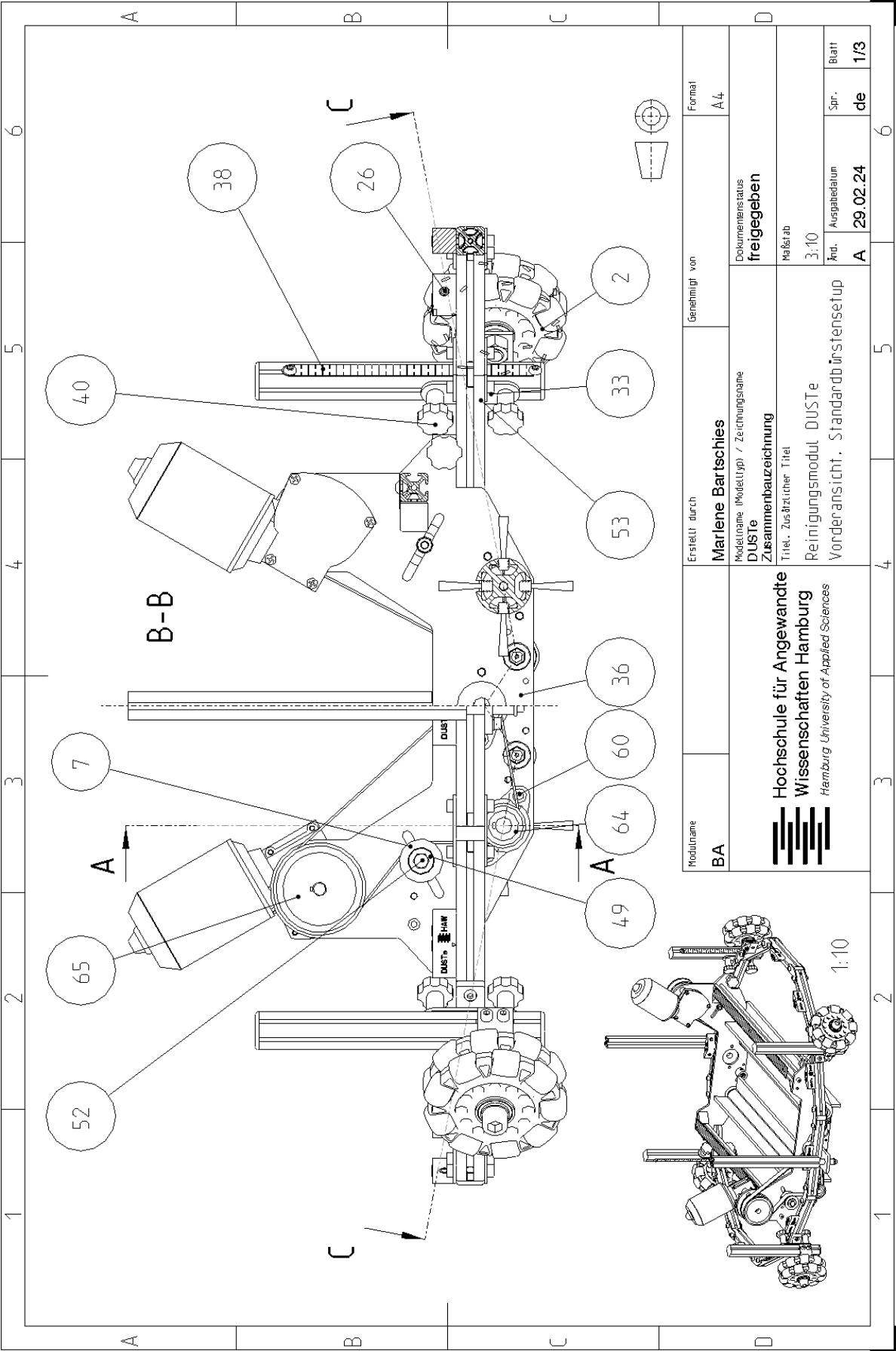


F Stückliste

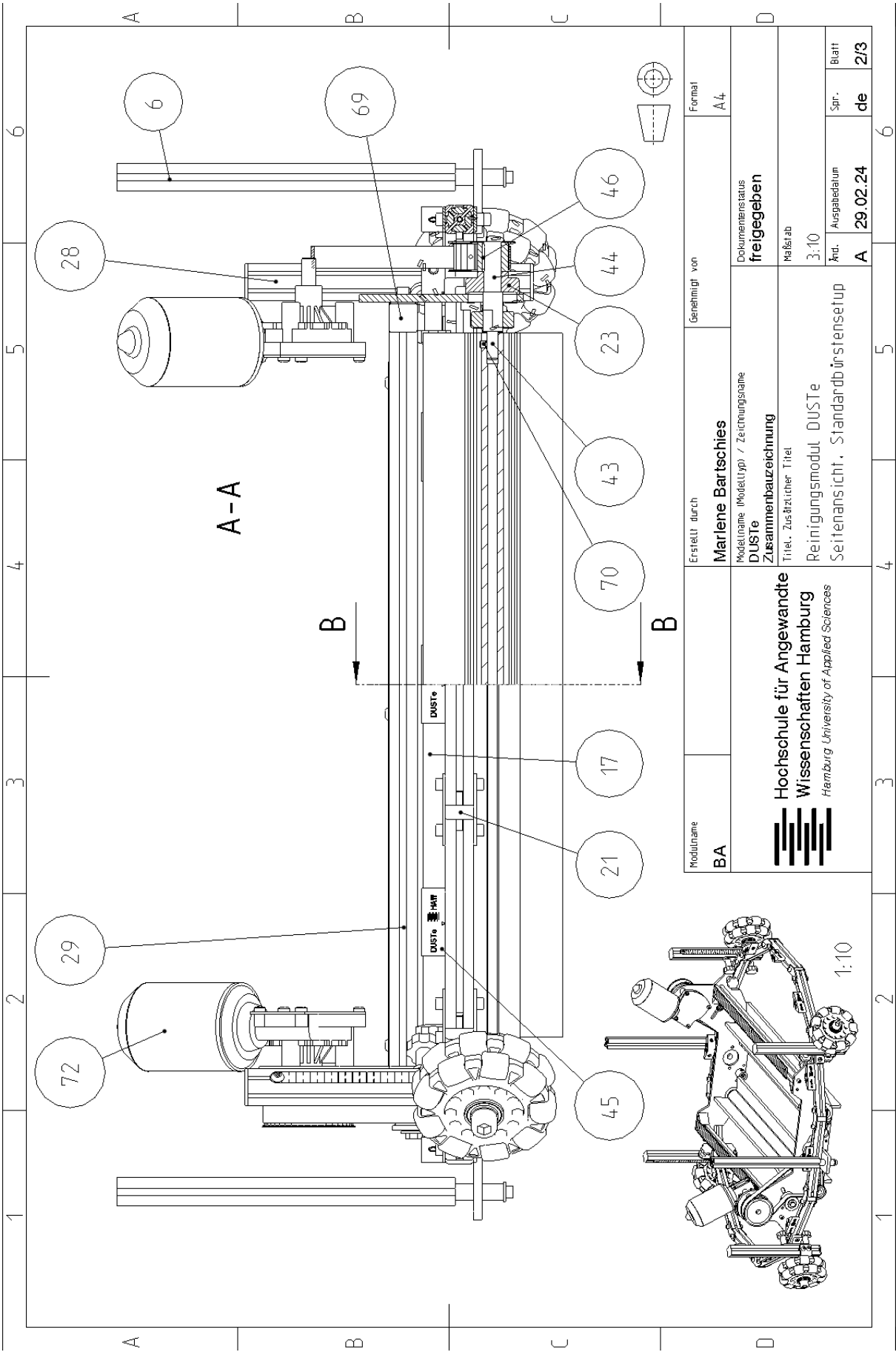
Lfd. Nr.	Menge in Skt.	Benennung / Dateiname	Identnummer / Norm / Kurzbezeichnung	Material	Gewicht 1 Stk
1	4	Klemmring_D14	62366114	Aluminium	15 g
2	4	Omni_Wheel	14049	Kunststoff	350 g
3	2	Adapter_buerste_klein			
4	2	Adapter_buerste_klein_2			
5	2	Buerste_klein			125
6	2	Item_Profil 5 20x20 Z-Fuehrung	0.0.370.03, 280mm	Alu	134 g
7	3	Riemenspannrad			
8	1	Welle_Buerste_klein		Aluminium	13 g
9	1	Welle_Buerste_klein_2			13 g
10	2	Wellenstumpf_Buerste			14 g
11	1	Wellenstumpf_Buerste_klein			5 g
12	1	Wellenstumpf_Buerste_klein_2			5 g
13	1	Zahnriemen_AT5_16_500	16671100		28 g
14	1	Zahnriemen_AT5_16_545	16671200		30 g
15	1	Zahnriemen_AT5_16_375	16670700		21 g
16	4	Rad_Adapter		PLA	
17	12	Item Winkel 5 20x20	0.0.425.03	Aluminium	168 g
18	8	Buerstenleiste	Mink-Flex FBL0908, 30 mm	Kunststoff	
19	8	Distanzhülsen	M5x5	Kunststoff	1 g
20	2	Z-Fuehrung_Distanzhuelse		Aluminium	10 g
21	12	Eckverbinder		Kunststoff	
22	24	Verbinderplatte		Aluminium	5 g
23	6	Flanschlager 12mm	SS-KFL001	Edelstahl	76 g
24	4	Flanschlager 8mm	SS-KFL08	Edelstahl	27 g
25	2	Z-Fuehrungsblech		Aluminium	40 g
26	34	Gewindeeinsatz_M5x5_8	M5 short	Messing	1 g
27	12	Item_Profil 5 20x20 Rahmen	0.0.370.03, 171,5mm	Aluminium	82 g
28	4	Item_Profil 5 20x20 Rad	0.0.370.03, 200mm	Aluminium	96 g
29	2	Item_Profil 5 20x20 Versteifung	0.0.370.03, 542mm	Aluminium	260 g
30	2	Item_Profil 5 20x20 Mbalken	0.0.370.03, 330mm	Aluminium	158 g
31	2	Profil-8-D40-NATUR	0.0.493.36, 500mm	Aluminium	735 g
32	141	Nutenstein 5 M5	0.0.425.11		2 g
33	4	Rad_Adapter_blech		Aluminium	10 g
34	4	Winkelverbinder		Aluminium	15 g
35	16	Rillenkugellager 12x28x8	SS 6001 2RS	Edelstahl	22 g
36	2	Seitenblech		Aluminium	450 g
37	1	Seitenbelch_mitte		Aluminium	190 g
38	4	Stahlmass_150		Edelstahl	18 g
39	2	Stahlmass_500		Edelstahl	94 g
40	20	Sterngriffschraube M5x25	M5x25		8 g
41	2	Unterlegscheibe M3	ISO 7089 - 4		1 g

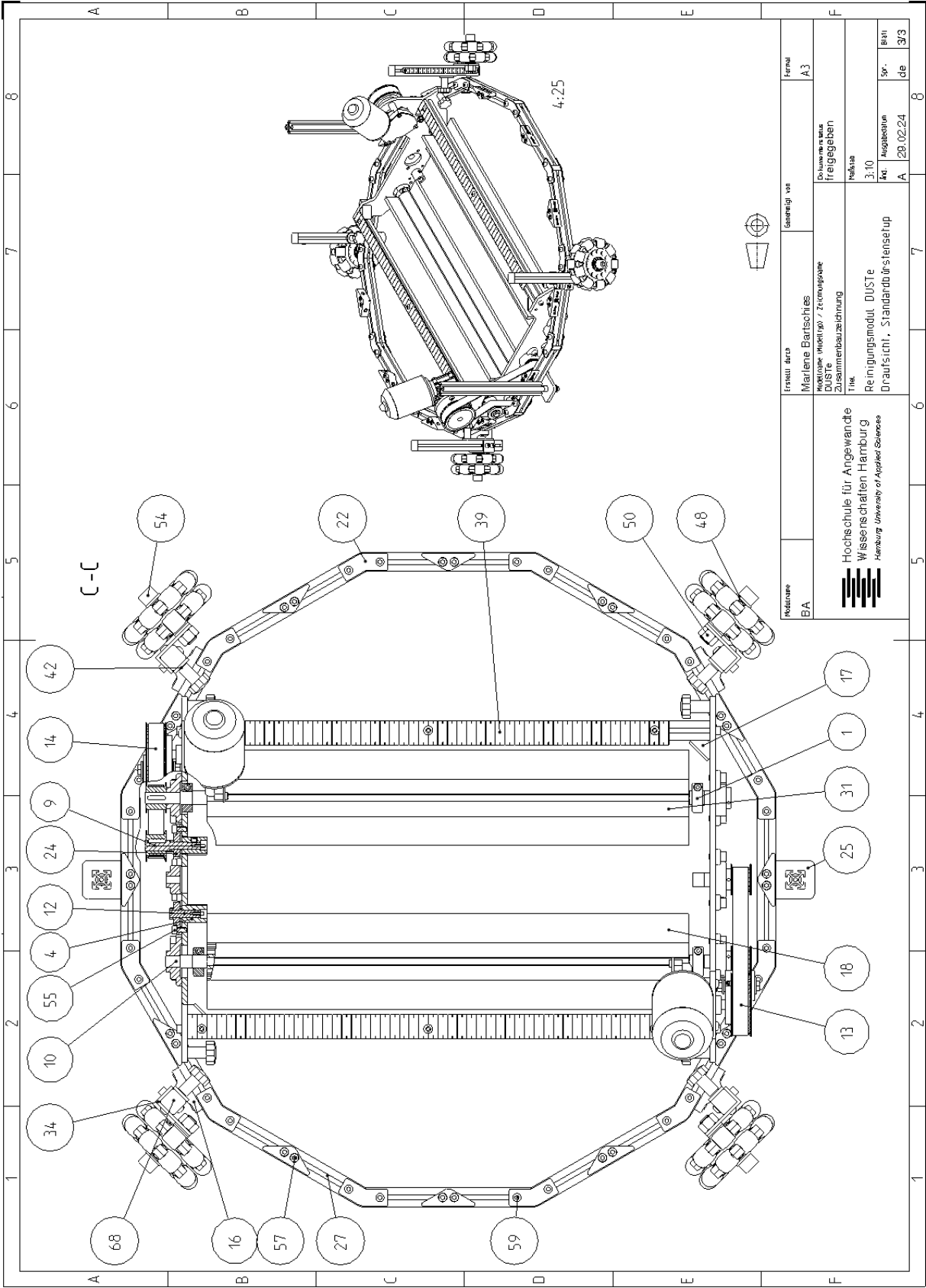
Lfd. Nr.	Menge in Skt.	Benennung / Dateiname	Identnummer / Norm / Kurzbezeichnung	Material	Gewicht 1 Stk
42	12	Unterlegscheibe M5	ISO 7089 - 5		1 g
43	4	Profilwelle Adapter 8-D40		Aluminium	7 g
44	3	Welle Motor		Aluminium	8 g
45	12	Anschlag Seitenblech		PLA	
46	2	Passfeder 4x18x4	DIN 6885-1 A4x4x18	Stahl allg.	3 g
47	6	Unterlegscheibe M6	ISO 7090-6		
48	12	Unterlegscheibe M12	ISO 7092 - M12		1 g
49	6	Unterlegscheibe M6	ISO7093-6		1 g
50	4	Sechskantmutter M12	DIN 4032 M12-6		2 g
51	6	Sechskantmutter M6	DIN 4032 M6		1 g
52	3	Sechskantschraube M6x50			
53	11	Senkkopfschraube M5x10	ISO 10642 - M5x10-8 8		
54	4	Zylinderschraube M12x60	DIN 6912 - M12x60-8 8		
55	16	Zylinderschraube M5x10	ISO 4762-M5x10-8 8		
56	4	Zylinderschraube M5x12	ISO 4762-M5x12-8 8		
57	28	Zylinderschraube M5x18	ISO 4762-M5x18-8 8		
58	2	Zylinderschraube M5x50	ISO 4762-M5x50-8 8		
59	64	Zylinderschraube M5x8	ISO 4762-M5x8-8 8		
60	12	Zylinderschraube M6x12	ISO 4762-M6x12-8 8		
61	2	Linsenkopfschraube M3x10	ISO 7380-1-M3x12-8 8		
62	26	Linsenkopfschraube M5x8	ISO 7380-1-M5x8-8 8		
63	6	Linsenschraube M6x20	ISO 7380-1-M6x20-8 8		
64	5	Zahnrad z16x16 1F AT5	16631600	Aluminium	35 g
65	2	Zahnrad z40x16 1F AT5	16634000	Aluminium	193 g
66	8	Abdeckkappe Winkel adapter	ähnlich 0.0.425.04	Kunststoff	
67	3	Gleitlager welle	AWMP 12 37 4	Aluminium	10
68	12	Abdeckkappe Item	0.0.370.09	Kunststoff	15 g
69	4	Abdeckkappe Item Winkel	0.0.425.04	Kunststoff	5 g
70	8	Madenschraube M5			
71	3	Kompaktbuchse Gleitlager	RJ260M-02-12	Kunststoff	
72	2	Buersten Motor 220rpm			1250 g
73	2	Spannfeder d8x16	D8x16	Stahl	
			Gesamtgewicht:		14,3 kg

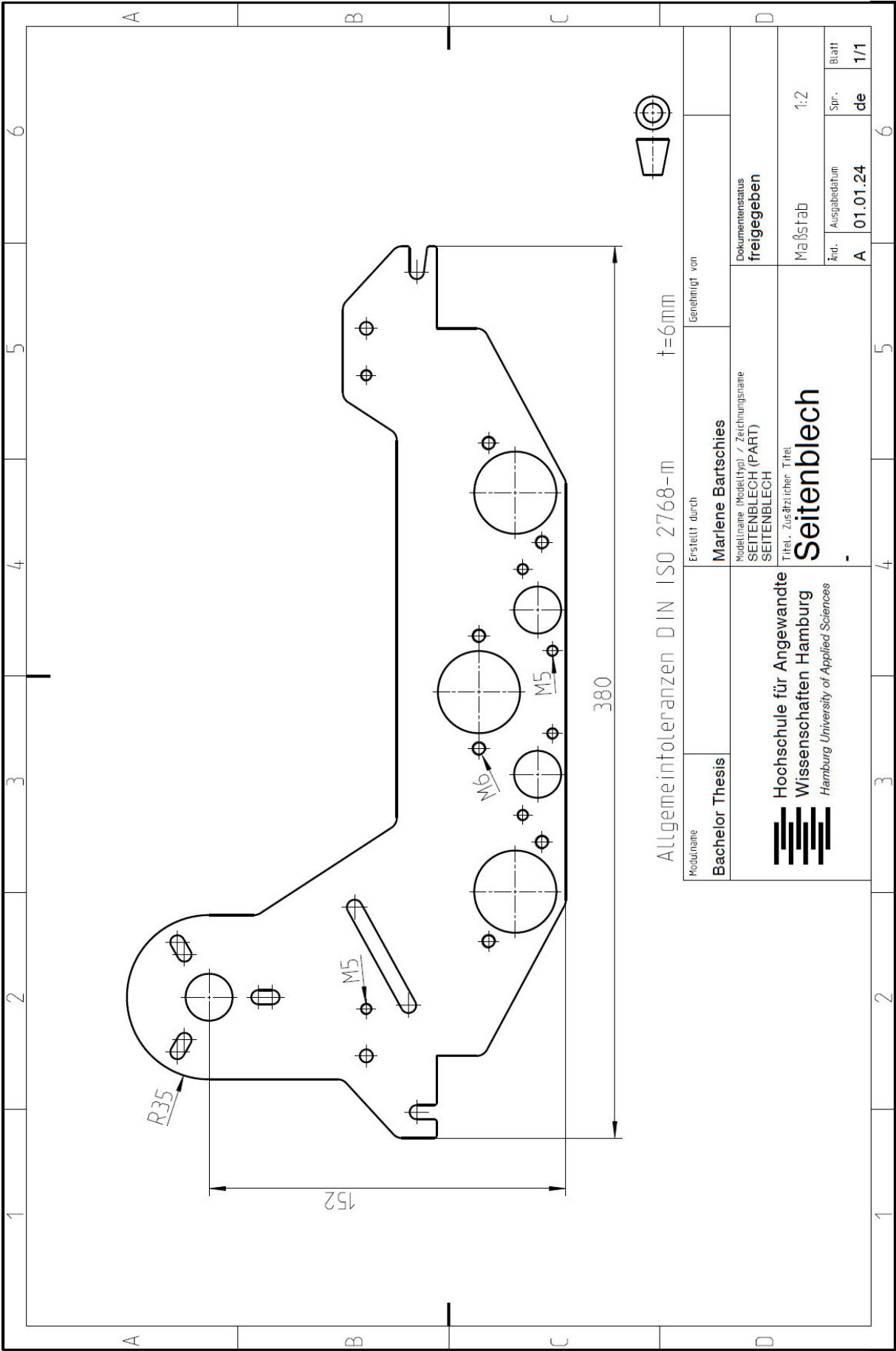
G Zeichnungen

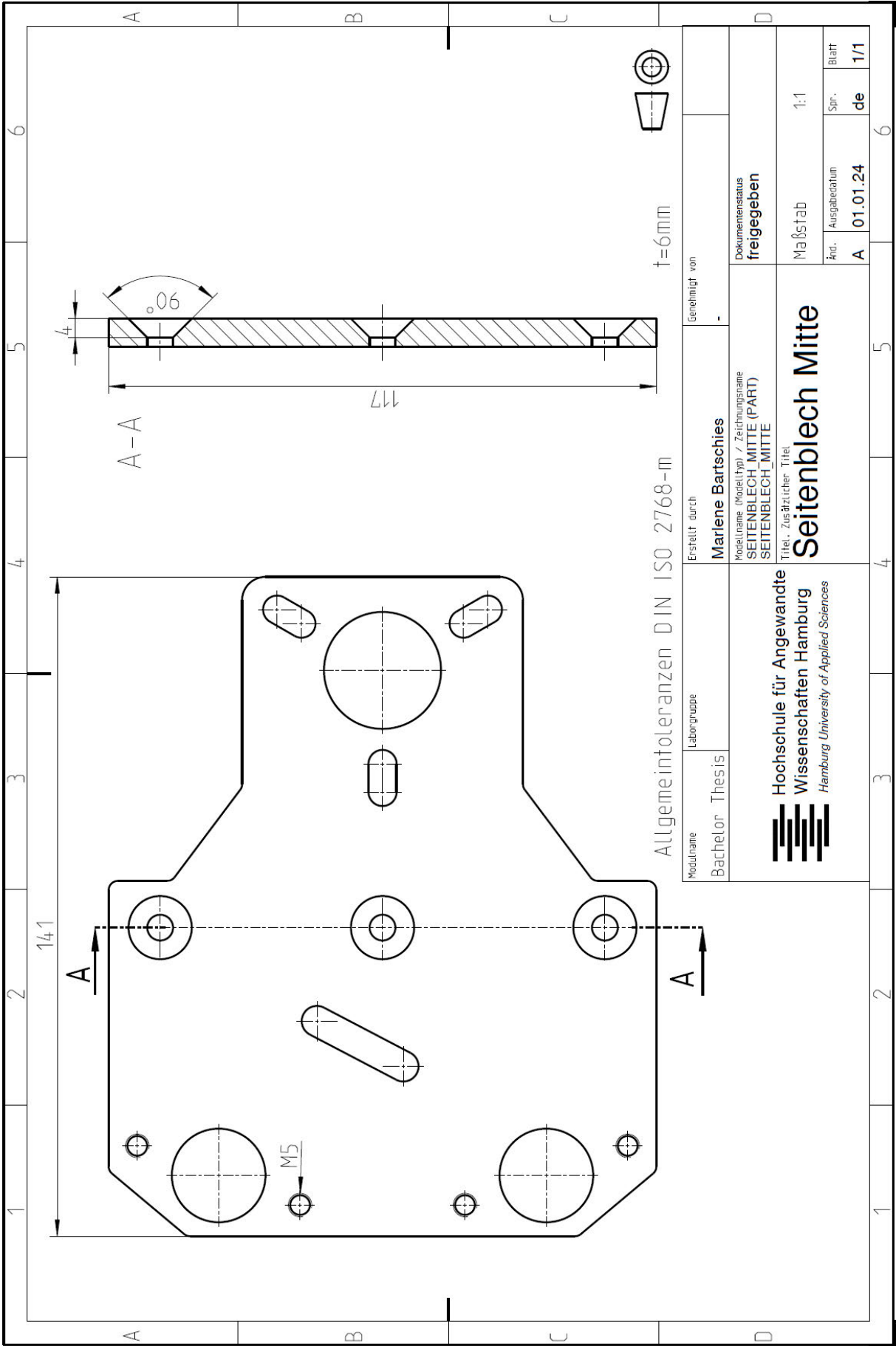


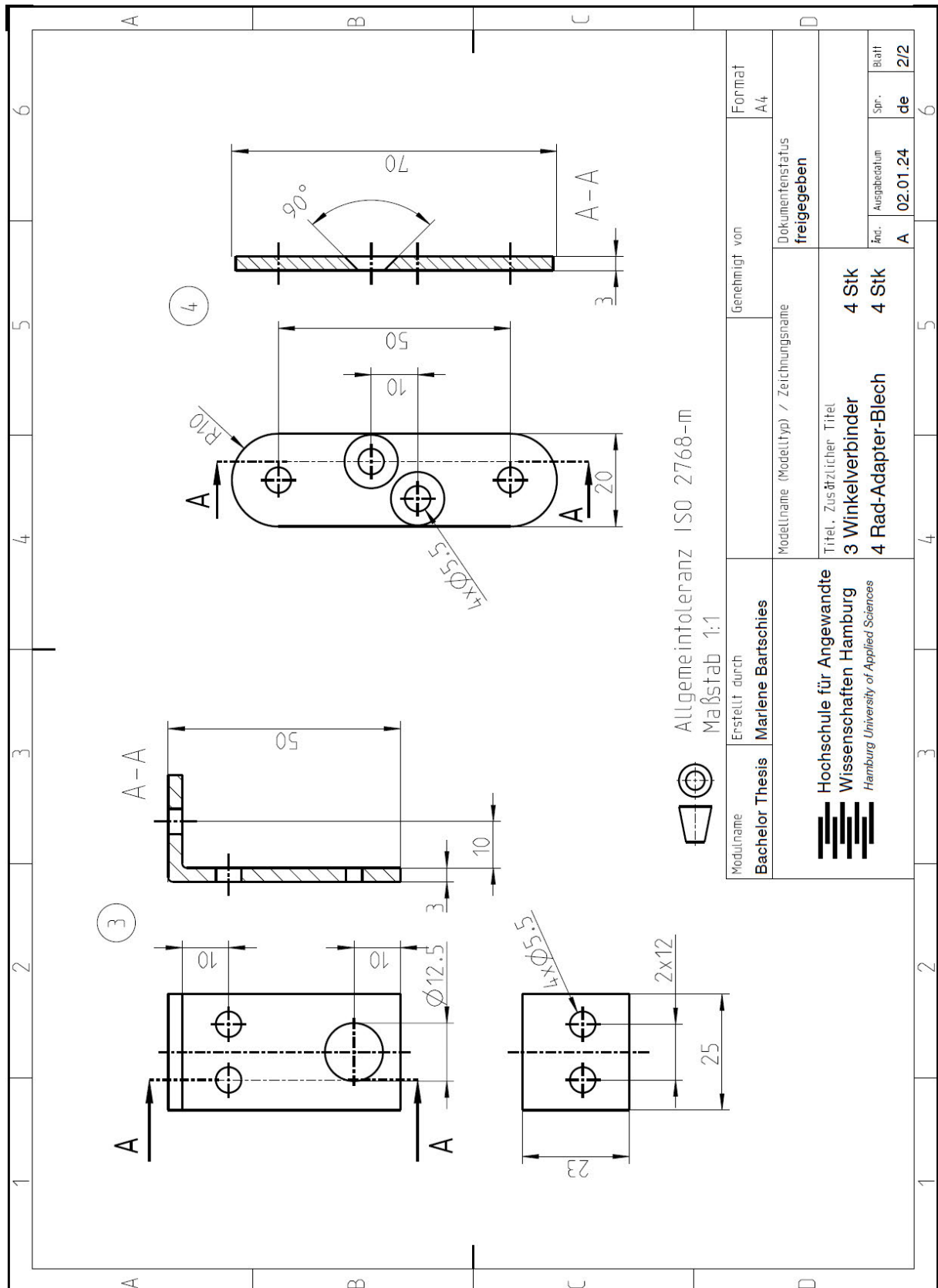
Modulname BA	Erstellt durch Marlene Bartschies	Genehmigt von	Format A4
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences	Modulname (Modultyp) / Zeichnungsname DUSTe Zusammenbauzeichnung	Dokumentationsstatus freigegeben	D
	Titel, zusätzlicher Titel Reinigungsmodul DUSTe	Maßstab 3:10	
	Vorderansicht, Standardbürstensetup	Änd. Ausgabedatum A 29.02.24	
		Spr. Blatt de 1/3	

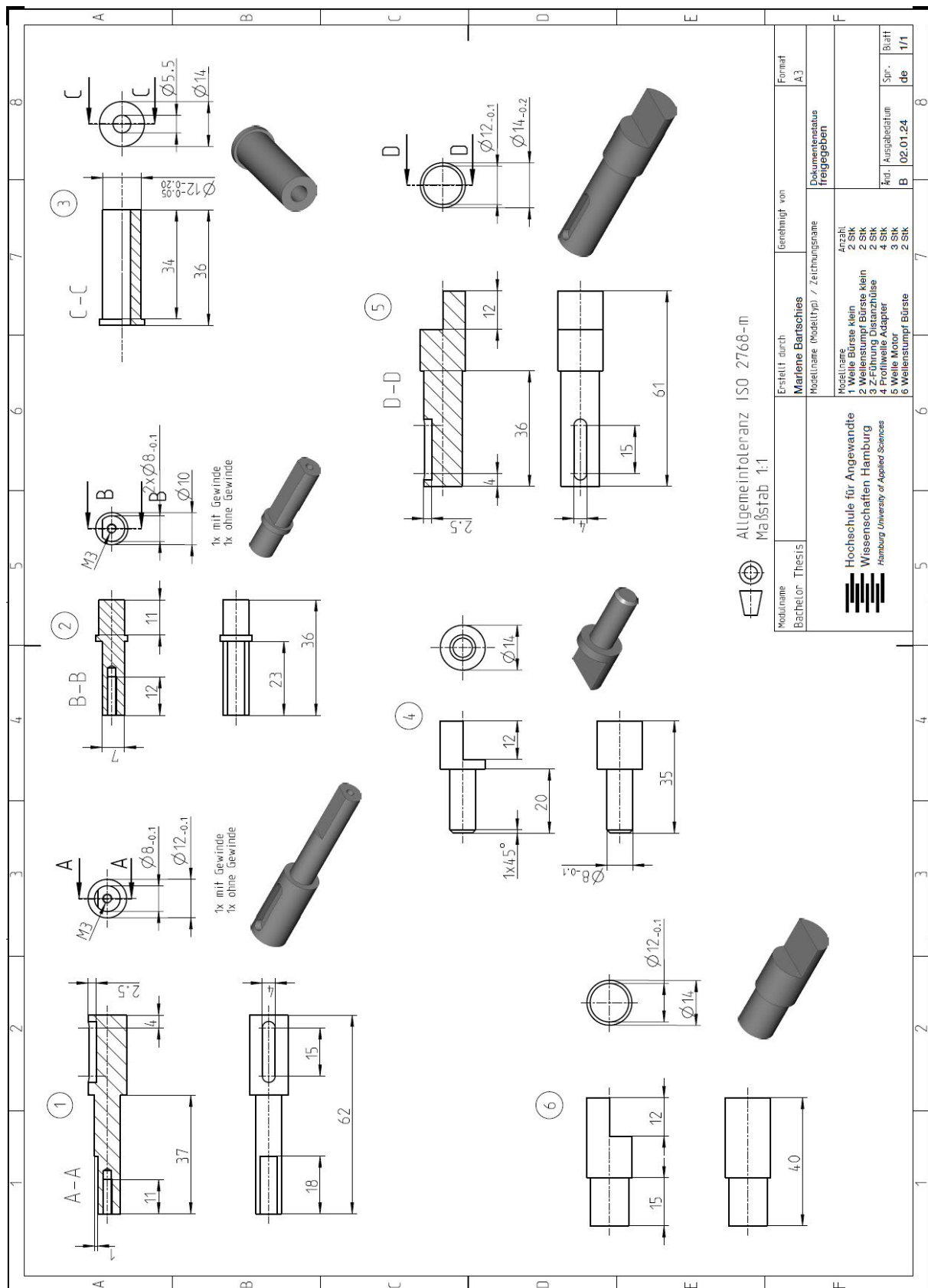






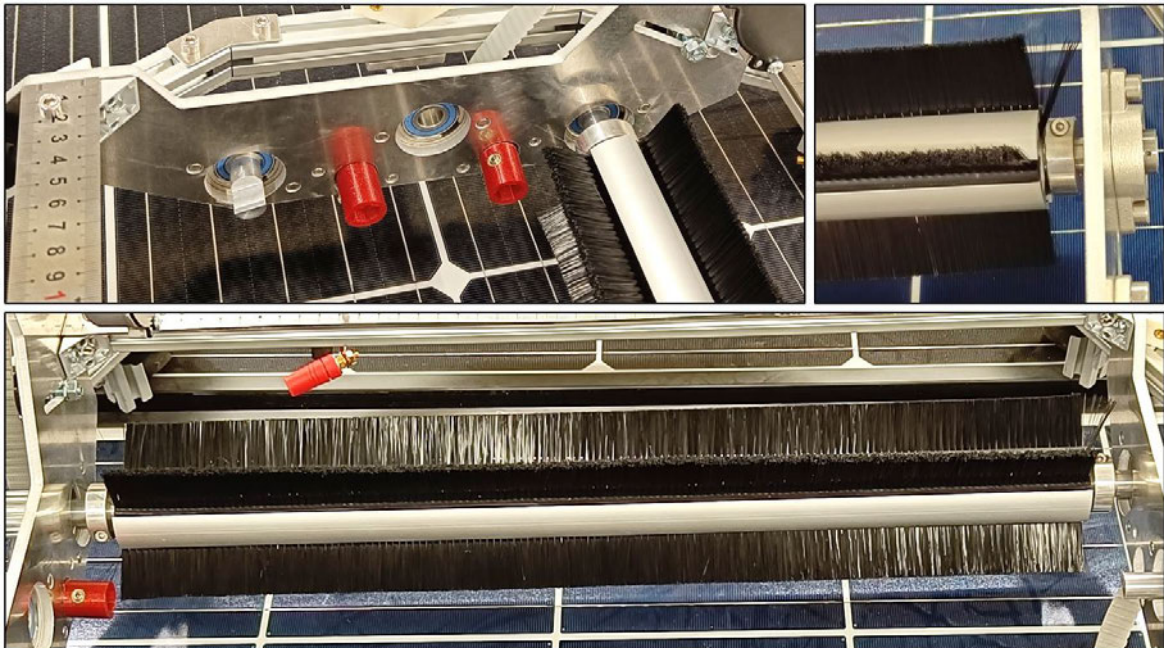




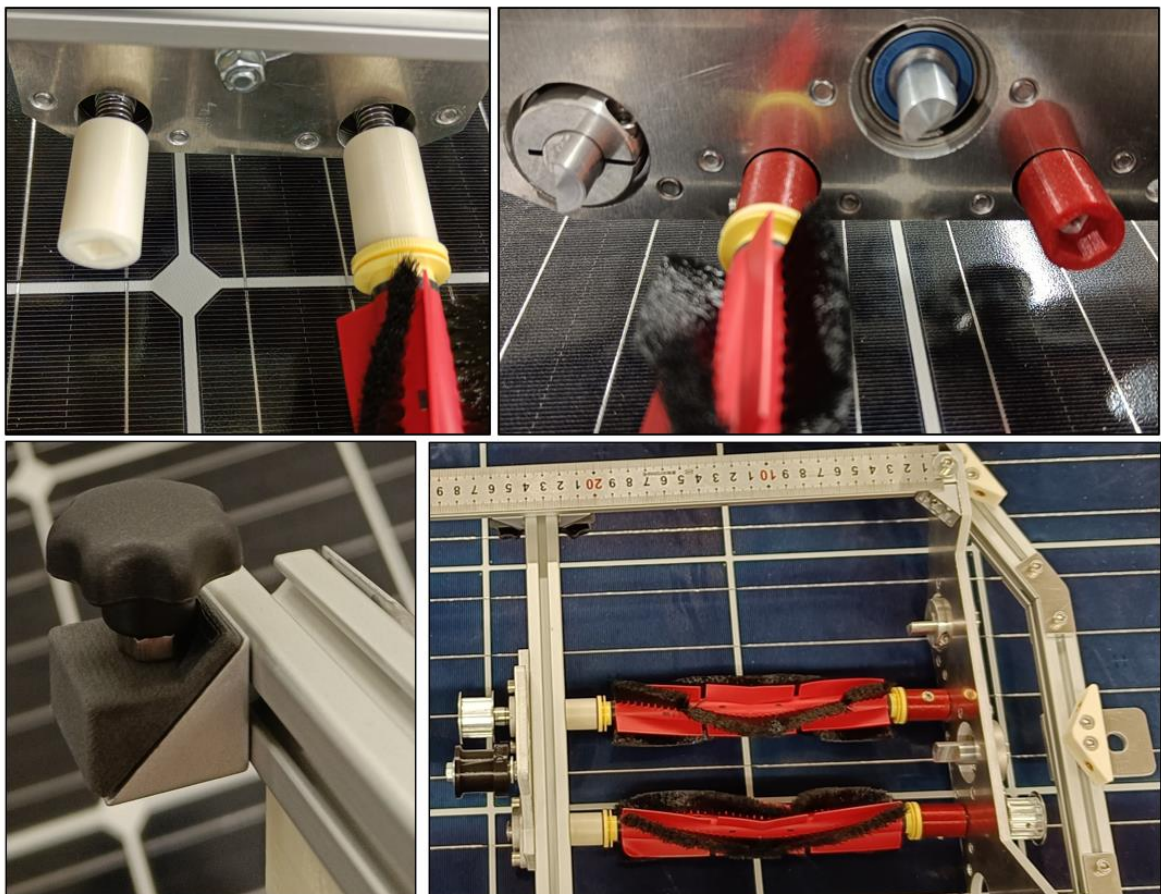


H Fotodokumentation

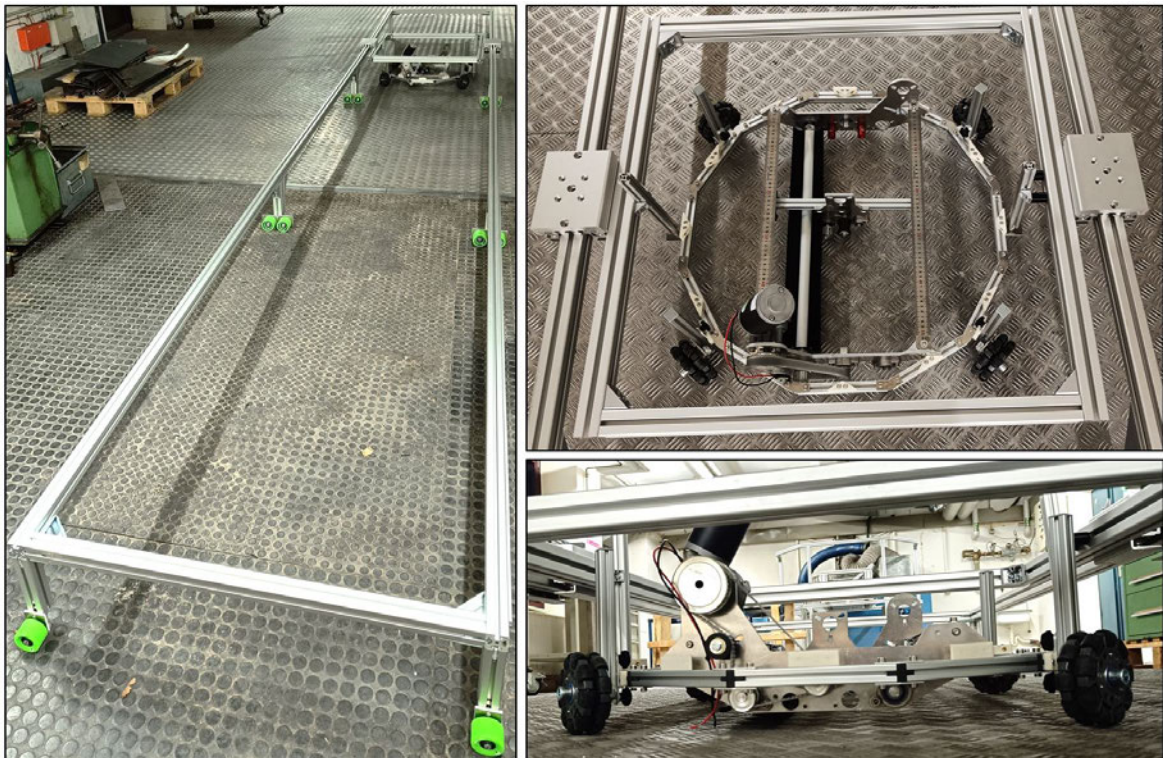
Ansichten des Bürstensetups der mittleren Bürsten-



Ansichten der kleinen Bürsten, der Verstellung des mittelbalkens und der Adapter.



Zusammenbau des gesamten Prüfstands mit Portalrahmen



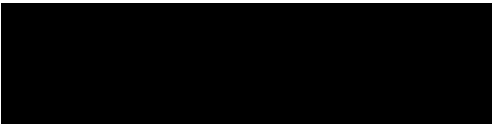
Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel:

Entwicklung eines adaptiven Prüfstands für die Solarpanelreinigung

selbständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe. Alle Passagen, die ich wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen wie z. B. Internetseiten übernommen habe, habe ich deutlich als Zitat mit Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Datum



Unterschrift