

BACHELORARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

„Bachelor of Science in Engineering“

im Studiengang Mechatronik/Robotik

Online gesteuerte Lehrplattform für Bilderkennung und Robotersteuerung

Ausgeführt von: Julian Katzenschwanz

Personenkennzeichen: 1610330034

1. BegutachterIn: Dominik Schremser, BSc

Wien, 13.06.2019

Eidesstattliche Erklärung

„Ich, als Autor / als Autorin und Urheber / Urheberin der vorliegenden Arbeit, bestätige mit meiner Unterschrift die Kenntnisnahme der einschlägigen urheber- und hochschulrechtlichen Bestimmungen (vgl. Urheberrechtsgesetz idgF sowie Satzungsteil Studienrechtliche Bestimmungen / Prüfungsordnung der FH Technikum Wien idgF).

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt und Gedankengut jeglicher Art aus fremden sowie selbst verfassten Quellen zur Gänze zitiert habe. Ich bin mir bei Nachweis fehlender Eigen- und Selbstständigkeit sowie dem Nachweis eines Vorsatzes zur Erschleichung einer positiven Beurteilung dieser Arbeit der Konsequenzen bewusst, die von der Studiengangsleitung ausgesprochen werden können (vgl. Satzungsteil Studienrechtliche Bestimmungen / Prüfungsordnung der FH Technikum Wien idgF).

Weiters bestätige ich, dass ich die vorliegende Arbeit bis dato nicht veröffentlicht und weder in gleicher noch in ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt habe. Ich versichere, dass die abgegebene Version jener im Uploadtool entspricht.“

Wien, 13.06.2019

Ort, Datum

Statenstaumer Julian

Unterschrift

Kurzfassung

Bilderkennung und Roboterkontrolle werden in der Automatisierung häufig gemeinsam eingesetzt - beispielsweise beim Verpacken von Pralinen mit Hilfe eines Kamerasystems und eines Delta-Roboters. In der Ausbildung erfolgt die Bilderkennung jedoch oft nur virtuell, ohne praktische Probleme zu lösen. Es sollte ein Demonstrator bereitgestellt werden, um durch praktische Übungen das virtuell Gelernte zu vertiefen. Dieser muss kompakt und zuverlässig sein, um ihn als geeignetes Lerninstrument für akademische Fakultäten rechtfertigen zu können. Ebenso sollte eine hohe Auslastung angestrebt werden, damit die Anlage durchgehen relevant ist. Diese Arbeit bildet die Grundlage für einen Online-Demonstrator, um mehr Nutzer zu erreichen. Ein kartesischer Roboter in Portalbauweise wird entwickelt und mit einer Kamera und einem Elektromagneten als Endeffektor ausgerüstet. Der Roboter wird online über eine numerische Steuerung betrieben, während die Ansicht der Kamera online gestreamt wird. Nach der Lokalisierung der Puzzleteile in einer Bilderkennungsübung kann der Roboter zum Testen der angewendeten Methoden und als praktisches Beispiel zum Lösen der Puzzles verwendet werden. Der konstruierte und gefertigte Portalroboter ist in der Lage, Puzzleteile mithilfe standardisierter numerischer Steuerungssprachen (G-Code) zu manipulieren. Ein Konzept für die Online-Implementierung der Kamera und der Steuerungsschnittstelle wurde entwickelt, aber im Rahmen dieser Arbeit nicht umgesetzt. Der Portalroboter ist in der Lage seine vorgesehene Aufgabe zu erfüllen, der Gesamtprozess muss aber noch verbessert werden, um eine funktionelle Lehrplattform zu erhalten. Zukünftig könnte an der Implementierung des Kamerasystems und der Onlineverbindung, der Entwicklung unterschiedlicher Puzzle und dem Erstellen von Bedienungs- und Übungsanleitungen gearbeitet werden.

Schlagwörter: Bilderkennung, Robotersteuerung, G-Code, Online Lehrplattform, Demonstrator, ferngesteuerte Laboratorien

Abstract

Image recognition and robot control are often used together in automation - for example, when chocolates are packaged with the help of a camera system and a delta robot. In education, however, image recognition is often only done virtually, without solving practical problems. An educational demonstrator should be provided to reinforce through practical exercises what has already been learned virtually. It has to be compact and reliable to be justifiable as a suitable learning tool for academic faculties. Likewise, a high utilization should be sought to increase the systems relevancy. This work lays the foundation for an online demonstrator to reach more users. A cartesian robot in gantry design is built and equipped with a camera and an electromagnet as the end effector. The robot is controlled online via numerical control, while the view of the camera is streamed online. After localizing the puzzle pieces in an image recognition exercise, the robot can be used to test the methods applied as a practical example to solve puzzles. The constructed and built gantry robot is able to manipulate puzzle pieces through the use of standardized numerical control languages, like G-Code. A concept for online implementation of the camera and the control interface is developed, but not implemented in the scope of this work. The robot is capable of its designed task, but the whole process still has to be improved to function as an operational online learning platform. Future work could be done on implementing the camera system and online connectivity, development of different puzzles as well as writing an instruction manual and educational exercises.

Keywords: image recognition, robot control, G-code, online learning platform, educational demonstrator, remotely controlled laboratories

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Zieldefinition.....	1
3	State of the Art Recherche	2
4	Systematische Vorgehensweise	4
4.1	Trello.....	4
4.2	V-Modell nach Bender.....	5
4.3	Scrum	6
5	Konzeptentwicklung Systemebene.....	8
5.1	Konzept I: Klassischer Candy Grabber	8
5.1.1	Funktionsmodell.....	8
5.1.2	Wirkmodell	9
5.2	Konzept II: Puzzlebot	9
5.2.1	Funktionsmodell.....	10
5.2.2	Wirkmodell	11
5.3	Gegenüberstellung der Konzepte.....	11
6	Konzeptentwicklung Subsystemebene	11
6.1	Roboterart.....	11
6.2	Fertigungsverfahren und Rahmenbedingungen	12
6.3	Motorenauswahl.....	12
6.4	Antriebsart	13
6.5	Entwerfen der Achskonzepte	13
6.5.1	Konzept X-Achse	14
6.5.2	Konzept Y-Achse	14
6.5.3	Konzept Z-Achse	14
6.5.4	Konzept A-Achse und Endeffektor	15
6.6	Konzeptentwicklung Informatik.....	15
6.6.1	G-Code	15
6.6.2	G-Code Interpreter.....	16
6.6.3	G-Code Sender.....	17

7	Ausarbeitung Komponentenebene	17
7.1	Ausarbeitung Mechanik.....	17
7.1.1	Rahmenstruktur	17
7.1.2	Linearführungen.....	18
7.1.3	Zahnriemen und Zubehör.....	18
7.1.4	X- und Y-Achse.....	19
7.1.5	Z-Achse	21
7.1.6	Endeffektor	21
7.2	Ausarbeitung Elektrik	22
7.2.1	Raspberry Pi	22
7.2.2	Kamera	22
7.2.3	Arduino Mega 2560 als G-Code Interpreter.....	22
7.2.4	RAMPS 1.4	22
7.2.5	Schrittmotoren	23
7.2.6	Schrittmotortreiber	23
7.2.7	Elektromagnet.....	24
7.2.8	Netzgerät	24
7.3	Ausarbeitung Informatik	24
7.3.1	Grbl Ableger als G-Code Interpreter.....	24
7.3.2	ChiliPeppr als G-Code Sender	25
7.3.3	Serial Port JSON Server	26
7.4	Informationsfluss des Puzzlebots	26
8	Ergebnisse und Diskussion.....	27
9	Zusammenfassung	31
10	Ausblick	32
	Literaturverzeichnis	33
	Abbildungsverzeichnis.....	35
	Abkürzungsverzeichnis.....	36

1 Einleitung

Bilderkennung und Roboterkontrolle sind zwei Problemstellungen, die häufig gemeinsam in der Automatisierungstechnik auftreten – zum Beispiel um Bauteile auf einem Förderband zu erkennen und per Pick-and-Place-Anwendung korrekt einzusortieren.

In der Lehre wird Bilderkennung oft nur virtuell abgehandelt, ohne Bezug zu praxisnahen Problemstellungen [1]. Für Roboterkontrolle wird dagegen meist auf Simulationssoftware zurückgegriffen oder auf simple Einführungsübungen an teuren Industrierobotern, falls diese im Lehrinstitut überhaupt vorhanden sind.

Ein vereinen dieser zwei Lehrbereiche in einer praktischen, praxisnahen Übung würde helfen gelerntes zu verfestigen, ein reales Gefühl für Industrieanwendungen schaffen und Interesse an Automatisierungstechnik wecken [2].

Dazu wird ein Demonstrator benötigt, anhand dessen Übungen vollzogen werden können. Um einen solchen Demonstrator als Lehrmittel für ein Institut rechtfertigen zu können, muss dieser platzsparend und zuverlässig arbeiten. Ebenso sollte eine hohe Auslastung angestrebt werden, damit die Relevanz des Lehrinstruments steigt.

Im Folgenden wird ein Demonstrator konzeptioniert, entwickelt und hergestellt, der den oben genannten Anforderungen entspricht.

2 Zieldefinition

Ziel dieser Bachelorarbeit ist das Entwickeln und Fertigen eines Demonstrators für die Lehre. Dieser soll Online steuerbar sein, um Studenten überall auf der Welt zur Verfügung zu stehen. Das Hauptaugenmerk der Lehrapplikation ist die praktische Umsetzung von Bilderkennungsmethoden an einem Roboter.

Ziele:

- Schaffen einer Industrienahen Anwendung für Bilderkennung und Robotersteuerung
- Entwickeln und fertigen eines robusten Roboters zum Verfahren des Endeffektors, im Platzbedarf unter 500x500mm
- Entwickeln und fertigen eines drehbaren Elektromagnets als Endeffektor zum Manipulieren von ferromagnetischen Puzzleteilen
- Modularität beim Endeffektor – einfacher Tausch des Endeffektors soll möglich sein, um Flexibilität für zukünftige Änderungen zu schaffen
- Anwendung einer industrienahen Robotersteuerung

Zusatzziele:

- Online Kamerabild für Draufsicht auf die Manipulationsplattform
- Implementation eines Webinterfaces zur Steuerung des Roboters
- Erstellen von manuellen Spielmodi
- Erstellen einer Bedienungsanleitung Bedienung
- Erstellen von Übungsanleitungen

Der Fokus der Arbeit liegt somit im Entwickeln und Fertigen einer soliden Roboterplattform, die als Grundlage des Demonstrators dienen soll. Nach robuster Erfüllung dieser Ziele wird die Vervollständigung der Lehrplattform angestrebt (siehe Zusatzziele), besonders die Kamera- und Onlineimplementierung, da diese wesentliche Bestandteile der Lehrplattform sind.

3 State of the Art Recherche

Erste Anfänge in der interaktiven Fernlehre wurden schon 1997 an Hochschulen in Form von Interaktiven Bildschirmexperimenten (IBE) getestet [3]. Dabei wurden reale Experimente in allen relevanten Positionen fotografisch aufgenommen. Die Fotos wurden mit der Interaktion des Benutzers, oftmals durch ziehen der Maus, verknüpft, um den Eindruck der direkten Manipulation des Experiments zu vermitteln. Vorreiter in der Entwicklung von IBE war das Institut für Fachdidaktik Physik und Lehrerbildung der TU Berlin, an der nach wie vor IBE zu z. B. Photonik ausprobiert werden können [4].

Heutzutage gibt es eine Vielzahl an ausgereiften, virtuellen Laboren. Dies geht von käuflich erwerbten virtuellen Laboren und Simulationen [5] bis hin zu staatlich geförderten Zusammenschlüssen aus Hochschulen, die ihre Labore frei zur Verfügung stellen. Ein Beispiel dafür ist „Open MINT Labs“ (OML) – ein Zusammenschluss aus drei deutschen Hochschulen [6]. Deren Fokus liegt dabei auf Elektrotechnik, Maschinenbau, Bauingenieurwesen sowie Physik, Chemie und Biologie [7]. Sie bauen hierbei die Labore nach einem Baustein-Konzept auf, wie in Abb. 1 zu sehen.

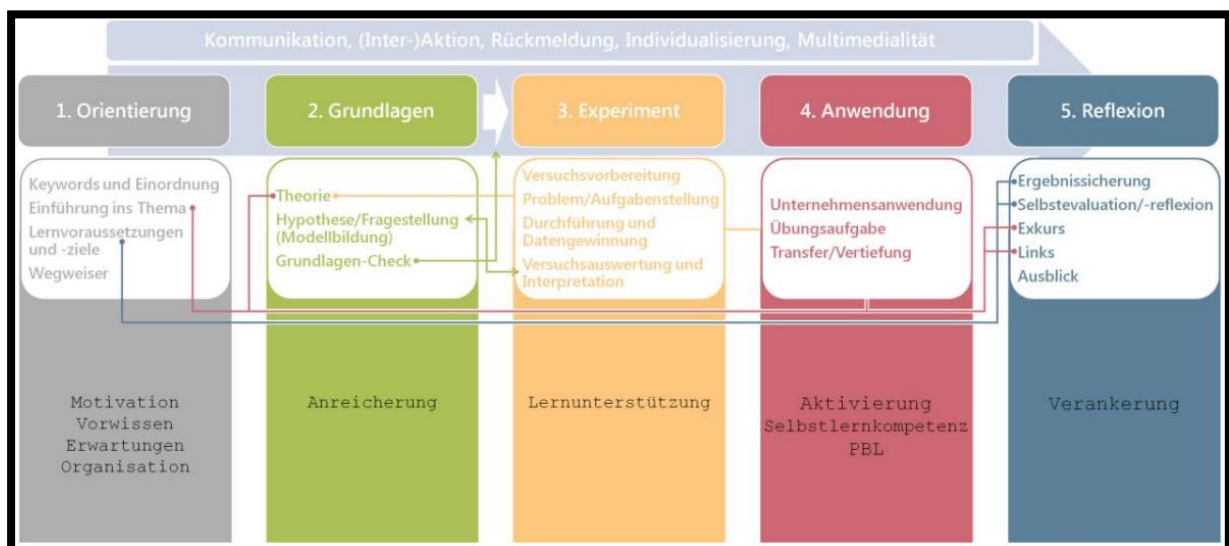


Abb. 1: Baustein-Konzept der Open MINT Labs [7]

Neben den virtuellen Laboren gibt es auch ferngesteuerte Labore, auch RCLs (Remote Controlled Laboratories) genannt. Dies sind reale Experimente oder Demonstratoren, die über das Internet ferngesteuert werden. Dabei wird dem Benutzer ermöglicht einen Versuch

auszuführen, ohne in der Nähe der Anlage zu sein. Zur Beobachtung des Experiments werden Webcams und Sensordaten verwendet.

Im Bestreben von RCLs ist eine intuitive Nutzung und Interaktivität durch Steuerung des Experiments oder Ändern der Prozessparameter. Neben der Beobachtung über Webcams müssen auch weitere Prozessdaten an den Nutzer übergeben werden – beispielsweise Sensorwerte in Form von Graphen. Die Authentizität des RCLs soll der eines Realversuchs gleichkommen, um die Glaubwürdigkeit des Versuchs zu gewährleisten. Weiters gehört die Bereitstellung von Hintergrundinformationen zum Versuch zu den angestrebten Zielen eines RCL, damit während des Experiments keine Fragen zum Ablauf oder der Bedienung anfallen [8].

Während die Entwicklung von RCLs zeitaufwändig und kostenintensiv ist, bieten sie großen Mehrwert für Lehrinstitute. Durch die Onlinezugänglichkeit kann die Auslastung der Systeme erhöht werden, was das Kosten-Nutzen Verhältnis deutlich steigert. Ein Übersetzen der RCLs in andere Sprachen kann die Anzahl möglicher Nutzer weiter erhöhen.

Um ein Experiment als RCL auszuführen, müssen einige Aspekte in Betracht gezogen werden: Authentische Durchführbarkeit, intuitive Bedienbarkeit und Vollständigkeit im Sinne des mitgegebenen Wissens zur Durchführung des Experiments [9].

Das RCL-Projekt [10] der Fakultät für Informatik an der Universität der Bundeswehr München betreut einige RCLs – darunter ein Windkanal (Abb. 2), Welpendel und Lichtgeschwindigkeitsversuch. Der Zugang zu den RCLs funktioniert ohne jegliche Barrieren – keine Installation, Anmeldung oder eingeschränkter Nutzerkreis.

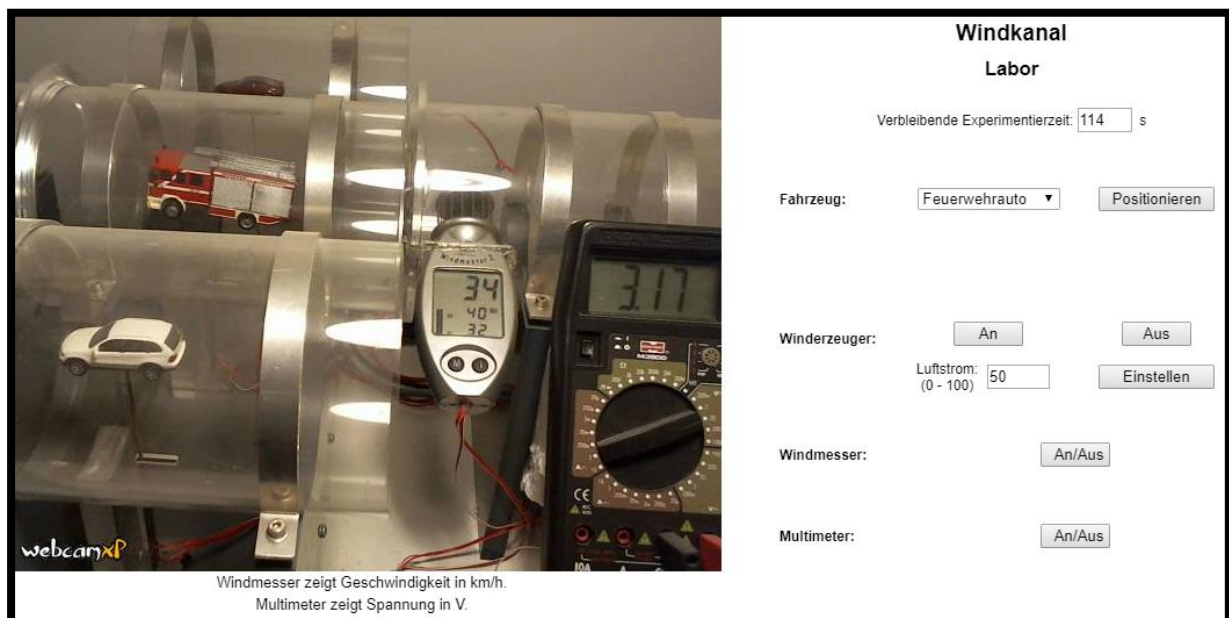


Abb. 2: Windkanal RCL des RCL-Projekts [10]

4 Systematische Vorgehensweise

Die systematische Vorgehensweise dieser Arbeit wurde in Trello (Kapitel 4.1) organisiert und dokumentiert. Dabei wurde nach dem Drei-Ebenen-V-Modell nach Bender (Kapitel 4.2) vorgegangen und eine vereinfachte Version von Scrum (Kapitel 4.3) angewendet. Es wurde ein Zeitplan erstellt, in dem die Meilensteine des Projekts abgebildet wurden. Die Meilensteine wurden in Arbeitsbereiche unterteilt. Diese wurden, je nach Bedarf, wiederum in Arbeitspakete unterteilt (Abb. 3). Abgeschlossene Tätigkeiten wurde regelmäßig übertragen, um den Projektfortschritt abzubilden.

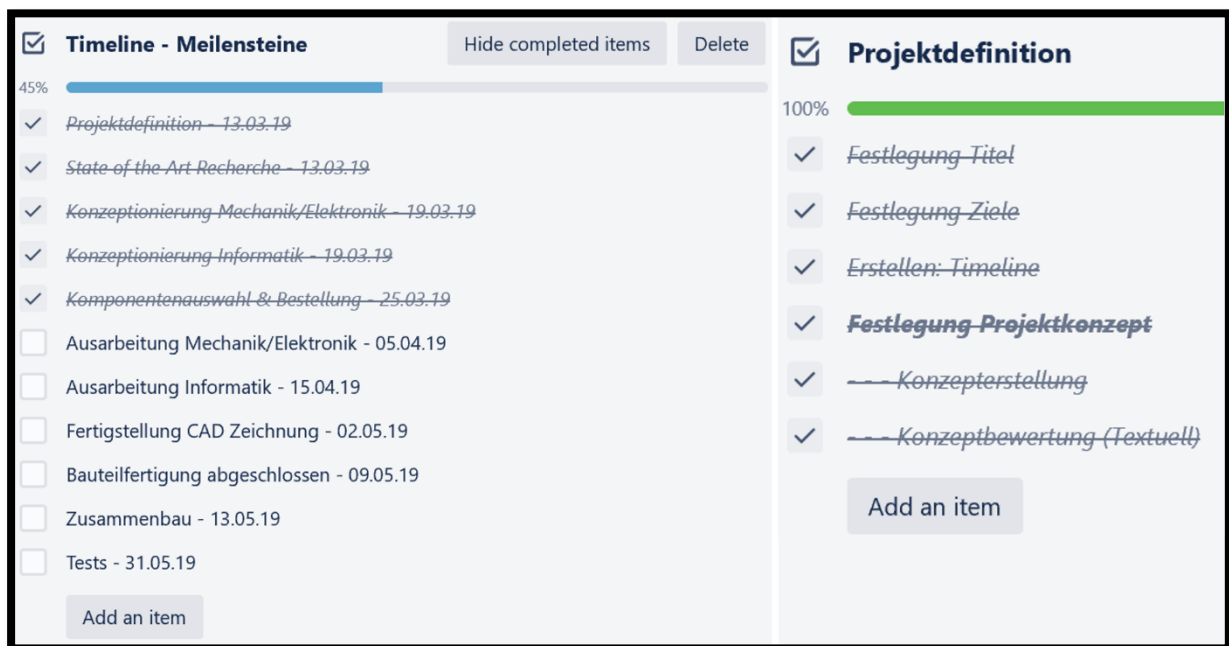


Abb. 3: Unterteilung in Meilensteine, Arbeitsbereiche und Arbeitspakete

4.1 Trello

Trello ist eine web-basierte Projektmanagement- und Produktivitätsplattform, die auf der Kanban-Projektmanagementmethode basiert [11]. Anhand dieser Methodik werden alle Projektaktivitäten an einer Pinnwand dargestellt, die von allen Projektmitgliedern begutachtet und bearbeitet werden kann. Die Pinnwand kann durch Listen, Karten, Gruppen, Untergruppen und Arbeitspakete individuell befüllt werden, um die Projektstätigkeiten und Fortschritte abzubilden. Zahlreiche Funktionen, wie z. B. Farbcodierungen, Checklisten und Fälligkeitsdaten, stehen zur Verfügung. Neben der web-basierten Browserapplikation gibt es Handy-Apps, die miteinander synchronisiert werden.

Eine weitere, wesentliche Funktion stellt die Integration anderer Tools und Plattformen dar. Beispielsweise können mehrere Karten direkt aus einer Excel-Liste erstellt werden oder Dateien direkt oder über Filesharing-Plattformen, wie Google Drive oder Dropbox, eingebunden werden.

4.2 V-Modell nach Bender

Das Drei-Ebenen-Vorgehensmodell (Abb. 4) zeigt in der Namensgebenden V-Form eine Entwicklungsmethodik, die auf die Entwicklung mechatronischer Produkte optimiert ist [12]. Dabei werden die drei Kerndisziplinen der Mechatronik [13] - Mechanik, Elektronik und Informatik – in den ineinander Verlaufenden Disziplinen farblich differenziert: Gelb steht für Software, Grau für Hardware und Blau für Mechanik.

Weiters ist das Modell vertikal in drei Ebenen unterteilt: System-, Subsystem- und Komponentenebene. Diese sind wiederum in deren Phasen unterteilt.

Die linke Seite zeigt dabei die Formgebenden Prozessschritte und besteht aus Analysen und Entwürfen – beginnend auf Systemebene, in der die Anforderungen und Konzepte des Gesamtsystems erarbeitet werden. Der Detailgrad steigt mit Fortschritt im Projekt, in dem sukzessive in tiefere Ebenen des Modells vorgedrungen wird.

Es ist weiters zu sehen, wie abhängig die Phasen der einzelnen Disziplinen miteinander sind. Ab Subsystem-Ebene kann bereits erkannt werden, dass die Mechanik-Entwicklung eigenständiger fortgeführt werden kann als die enger miteinander verbundenen Hardware- und Software-Phasen.

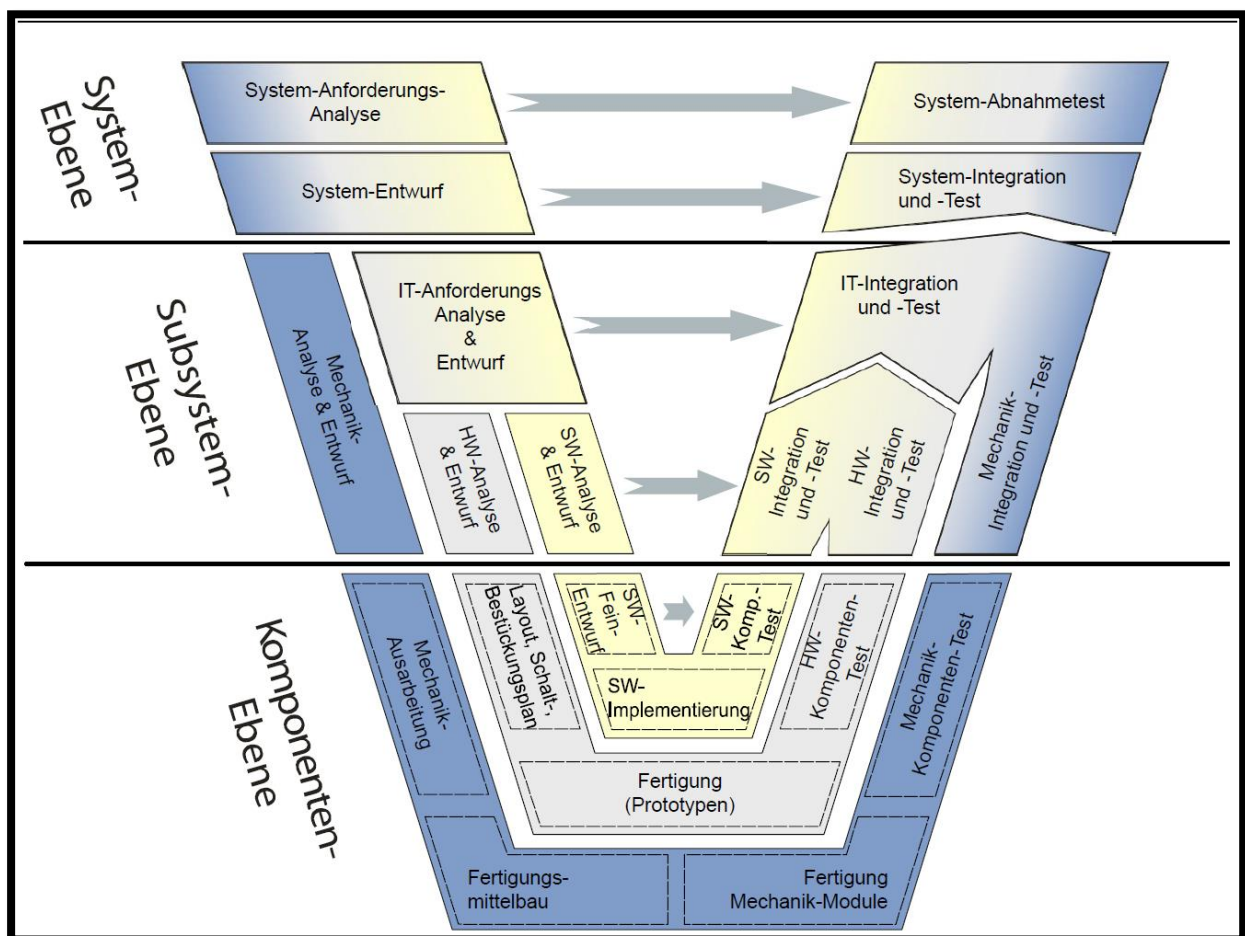


Abb. 4: Drei-Ebenen-Vorgehensmodell nach Bender [12]

Die Komponentenebene stellt die Fertigstellung der Entwürfe dar, sowie Fertigung und Montage des Systems. Ebenso dient sie als Übergang zur rechten Seite, die für das Testen der jeweiligen Funktionen und Anforderungen zuständig ist. Dies beginnt mit den Tests der einzelnen Komponenten und arbeitet sich wieder die Ebenen nach oben, wo es mit dem System-Abnahmetest auf höchster Ebene endet. Die durchzuführenden Tests werden aus den Anforderungen der linken Seite abgeleitet und durch die grauen Pfeile symbolisiert.

4.3 Scrum

Scrum ist ein Vorgehensmodell für Projektmanagement und zählt dort zu den agilen Methoden [14]. Es wurde 1993 von Jeff Sutherland und Ken Schwaber entwickelt und hatte seine Anfänge vor allem in der Software Entwicklung. Inzwischen wird Scrum auch in vielen anderen Bereichen eingesetzt.

Es ist kein Prozess oder eine vorgegebene Methode, sondern vielmehr ein Rahmenwerk um auf komplexe, agile Aufgabenstellungen eingehen zu können [15]. Durch die klare und einfache Definition der Rollen und Tätigkeiten gilt Scrum als simpel und einfach zu verstehen, in der Praxis kann die Umsetzung aber schwer zu meistern sein [16].

Die Komponenten des Scrum-Rahmenwerks sind Scrum-Teams, Ereignisse und Artefakte.

Im Scrum-Rahmenwerk existieren drei Rollen, die im Scrum Team zusammengefasst werden: Scrum Master, Product Owner und Entwicklungsteam.

Der Product Owner ist für den wirtschaftlichen Erfolg des Produkts verantwortlich. Er erstellt und priorisiert die Produkteigenschaften und legt diese im Product Backlog fest.

Das Entwicklungsteam erarbeitet die im Product Backlog festgelegten Funktionalitäten in der dort beschriebenen Reihenfolge ab. Dabei werden sogenannte Sprints festgelegt – mehrwöchige Arbeitspakete zum Erreichen der ausgewählten Produktfunktionalität. Ein Sprint beginnt mit der Sprintplanung und endet mit einem Sprint Review. Während des Sprints darf keine Änderung gemacht werden, die das Sprintziel beeinflussen würde. Sprints können weiter in Arbeitsschritte (Tasks) unterteilt werden, die in der Regel nicht länger als einen Tag andauern – dies wird im Sprint Backlog festgehalten und vom Entwicklungsteam abgearbeitet.

Der Scrum Master ist für die Einhaltung des Rahmenwerks verantwortlich. Er nimmt übernimmt eine Coachingrolle und versucht Hindernisse im Prozess aufzulösen. Dazu gehören mangelhafte Zusammenarbeit und Kommunikation im Projektteam.

Zu den Ereignissen in Scrum gehören Sprintplanung, Daily Scrum, Sprint Review und Sprint Retrospektive. Bei der Sprintplanung wird geklärt, was in den Sprint aufgenommen und wie dies dort umgesetzt wird.

Im Daily Scrum bespricht das Entwicklungsteam den aktuellen Stand des Sprints, um den Informationsaustausch aufrecht zu erhalten. Dies erlaubt dem Team den Überblick zu

behalten und auf Probleme zu reagieren, beispielsweise wenn ein Arbeitsschritt mehr Zeit in Anspruch nimmt als geplant.

Am Ende eines Sprints findet das Review und die Retrospektive statt. Im Review werden die Ergebnisse präsentiert, überprüft, ob das gesetzte Ziel aus der Sprintplanung erfüllt wurde und überlegt was die nächsten Schritte sind.

In der Sprint Retrospektive dagegen überprüft das Scrum Team nicht das Ergebnis des Sprints, sondern die bisherige Arbeitsweise. Dieser iterative Dialog erlaubt es auf Probleme einzugehen und zukünftige Sprints effektiver zu gestalten.

Artefakte werden im Scrum die transparenten, laufend weiterentwickelten Dokumente genannt. Dazu gehört das Product Backlog, das Sprint Backlog und die Product Increments. Das Product Backlog ist die vom Project Owner gepflegte Auflistung der Produktanforderungen. Dies wird laufend angepasst, mitunter auch zusammen mit dem Entwicklungsteam. Dies wird Product Backlog Refinement genannt, hierbei werden z. B. gemeinsam Einträge weiter detailliert oder deren Aufwand eingeschätzt.

Das Sprint Backlog dient der Übersicht über den aktuellen Bearbeitungsstand und wird vom Entwicklungsteam mit zu erledigenden Aufgaben befüllt.

Im Product Increment werden alle vollständig erfüllten Arbeitspakete der abgeschlossenen Sprints eingetragen. Dies gibt einen Überblick über die fertigen Anforderungen des Produkts.

In dieser Arbeit wurde Scrum in vereinfachter Form angewendet. Die Definition der Meilensteine fungierten als Annäherung an Sprints, während in Trello ein Sprint Backlog mit den Arbeitspaketen und Tasks geführt wurde. Der Projektbetreuer fungierte als Scrum Master und hielt regelmäßige Daily Scrums.

5 Konzeptentwicklung Systemebene

Der Projektidee entwickelte sich aus einer anderen Bachelorarbeit, in der ein Candy Grabber (Abb. 5) Online mithilfe einer Kamera ansteuerbar gemacht wurde.



Abb. 5: Candy Grabber [17]

Als Ziel dieses Projekts wurde nun das Erstellen eines Demonstrators für die Lehre festgelegt, der Weltweit vom Internet aus bedient werden kann. Die Grundidee war es, dass Candy Grabber-Spielzeug robust nachzubauen, um daraus eine Lehrplattform zu machen – beispielsweise zum Üben von Bilderkennungsalgorithmen.

Im Folgenden wird dieses Konzept analysiert und mit einem anderen verglichen.

5.1 Konzept I: Klassischer Candy Grabber

Dieses Konzept folgt der ursprünglichen Ausschreibung des Bachelorthemas. Dabei soll der bestehende Spielzeug-Candy Grabber auf robuste Art und Weise nachgebaut werden. Die Größe soll etwa gängigen Fused Deposition Modeling (FDM) Druckern entsprechen. Die Anlage beinhaltet einen verfahrbaren Greifer und versucht damit Süßigkeiten aus dem Vorrat zu entnehmen.

5.1.1 Funktionsmodell

1. Greifen von Objekten (Schüttgut) als 2,5D Anwendung
2. Steuer- und Programmierbar über Internet
3. Visualisieren des Manipulationsraums über Internet

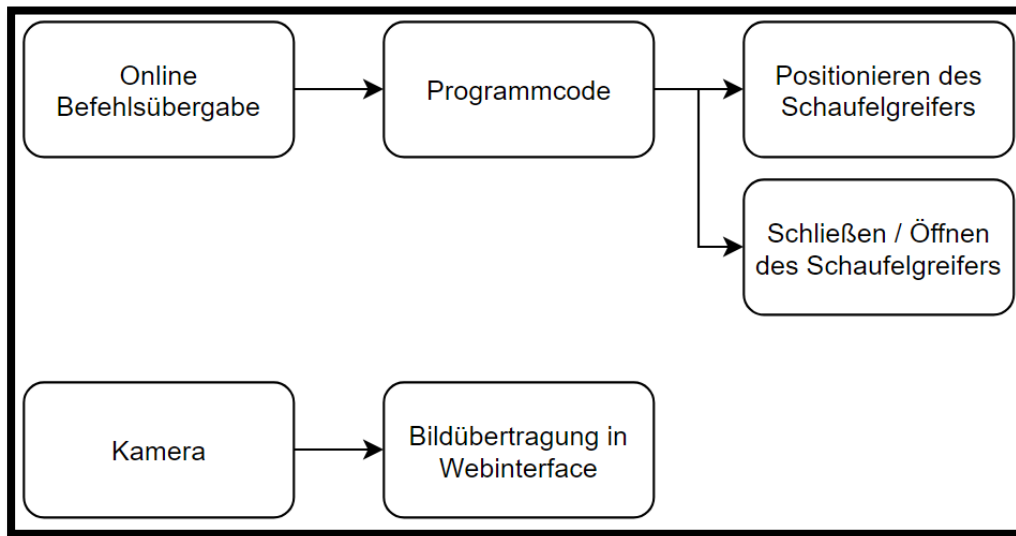


Abb. 6: Funktionsmodell Candy Grabber

5.1.2 Wirkmodell

1. Schaufelgreifer als Manipulator, bewegbar über X-, Y- und Z Achse
2. Webinterface zum händischen Verfahren, Schnittstelle zum Senden von Befehlen
3. Kamerabild im Webinterface integriert

5.2 Konzept II: Puzzlebot

In diesem Konzept wird der Schaufelgreifer durch einen drehbaren Elektromagneten ersetzt. Statt Süßigkeiten kann z. B. lackiertes oder bedrucktes Eisenblech als Puzzleteile (Abb. 7) zur Manipulation bereitstehen. Auch 1-, 2- oder 5-Euro-Cent Münzen eignen sich durch ihren Eisenkern ebenso gut zum Manipulieren.

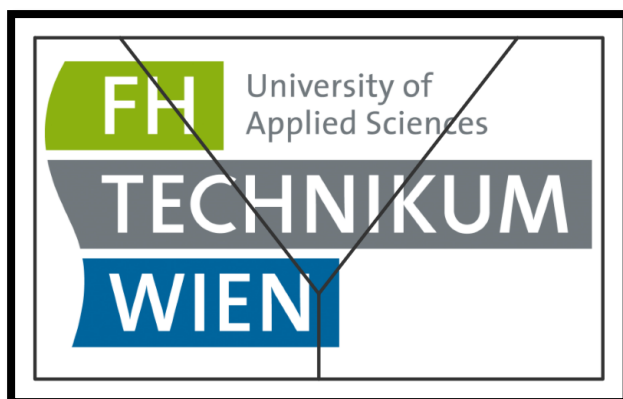


Abb. 7: Beispiel eines dreiteiligen geometrischen Puzzles [18]

Dies ermöglicht eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten und erlaubt definierte Objekte, die auf unterschiedlichste Bilderkennungsübungen ausgelegt werden können.

Vorstellbar wären, unter anderem:

- Zerteiltes FH Technikum Logo (Abb. 7) für Kachel-Puzzle
- Geometrisch gleiche, farblich unterschiedliche Puzzlestücke für Mosaikbilder
- Viele kleine Kreise für Packungsdichten Veranschaulichung in 2D (z. B. Kubisch Primitive Packung gegenüber Kubisch flächenzentrierte Packung)
- Tangram, ein kreatives chinesisches Legespiel
- Brettspiele, wie Schiffe versenken oder Mühle

Während die Auswahl an geeigneten Spielen oder Puzzles bereits groß ist, bietet dieses Konzept auch viele Erweiterungsmöglichkeiten. Dies reicht von Hardware Erweiterungen, wie Puzzlewechselsystem oder Schiebern zum Leeren der Spielflächen, bis hin zu Software Lösungen – beispielsweise der automatisierten Erkennung der Spielfiguren oder Puzzleteile, um die Ausgangszustände der Spielmodi wiederherzustellen. Dieses Konzept hat somit auch das Potenzial, zukünftigen Forschungsarbeiten als Plattform zu dienen.

5.2.1 Funktionsmodell

1. Manipulieren von Objekten im 3D Raum
2. Steuer- und Programmierbar über Internet
3. Visualisieren der Manipulationsfläche über Internet

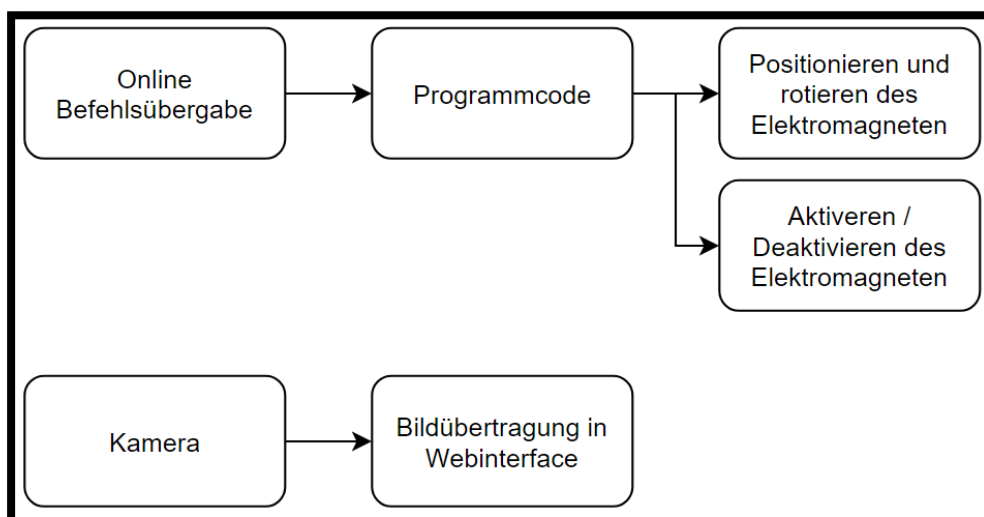


Abb. 8: Funktionsmodell Puzzlebot

5.2.2 Wirkmodell

1. Drehbarer Elektromagnet als Manipulator, translatorisch bewegbar über X-, Y- und Z-Achse, rotatorisch über A-Achse
2. Webinterface zum händischen Verfahren, Schnittstelle zum Schicken von Befehlen
3. Kamerabild der Manipulationsfläche im Webinterface integriert

5.3 Gegenüberstellung der Konzepte

Da die Lehrplattform aus der Ferne Online bedient werden soll, ist die lokale Ausgabe von Süßigkeiten des Candy Grabber Konzepts unbrauchbar. Das Geschicklichkeitsspiel verliert durch die erschwerte Sicht über eine Kamera, der Verzögerung des Kamerabilds und der - selbst bei Erfolg - ausbleibenden Süßigkeitsbelohnung an Reiz. Weiters ist die Bilderkennung von losen Süßigkeiten problematisch, da diese gerne gehäuft oder undefiniert daliegen, komplizierte Geometrien aufweisen oder farblich unterschiedlich sind.

In dem Puzzlebot-Konzept ist das Agilitätsspiel des Candy Grabbers – also die feinmotorische Greifersteuerung um eine Süßigkeit zu ergattern – durch ein reproduzierbares „Pick and Place“ System getauscht. Die Spielobjekte sind vielfältig zu gestalten, können aber klar definierte Merkmale aufweisen, um gezielte Übungen auf der Lehrplattform durchzuführen – wie z.B. Kantenerkennung oder Farberkennung der Puzzleteile.

Der Puzzlebot ermöglicht die tatsächliche Anwendung von z. B. Bilderkennungsalgorithmen und verbindet sie mit Roboterprogrammierung. Die Möglichkeiten zur nachträglichen Erweiterung allein durch andere Puzzlearten sind enorm. Auch eine Erweiterung auf eine 3D Spielfläche ist durch weitere Sensoren (z. B. extra Kameras) denkbar.

6 Konzeptentwicklung Subsystemebene

Um den Systementwurf des Puzzlebots näher zu definieren, werden nun Subsysteme analysiert und entworfen.

6.1 Roboterart

Als Robotertyp wird ein Portalroboter gewählt, da dessen Eigenschaften ideal zur Pick and Place Anwendung des Puzzlebots passen. Aus der kartesischen Bauweise, in der die Bewegungsachsen des Roboters mit den Achsen des Koordinatensystems übereinstimmen, ergibt sich ein simples, vielfältiges und erprobtes Design – siehe beispielsweise Laserschneider oder FDM-Drucker.

6.2 Fertigungsverfahren und Rahmenbedingungen

Für den Entwurf der Subkomponenten ist es notwendig, die zur Verfügung stehenden Fertigungsverfahren und Rahmenbedingungen näher zu betrachten, um die Machbarkeit der entstehenden Entwürfe zu gewährleisten.

Die Rahmenbedingungen für das Projekt wurden ausgelegt als:

- Präferiertes verwenden von bereits vorhanden Material und Komponenten
- Zukaufen von zusätzlich notwendigem Material und Komponenten
- Verwenden der Intern vorhanden Fertigungsverfahren

Die zur Verfügung stehenden Fertigungsverfahren sind, neben einer Auswahl an Handarbeitswerkzeug, Bohren, Sägen, Drehen, Fräsen, Laserschneiden und Additive Fertigung mittels FDM- und SLS-Druckern (Selektives Laser Sintern).

Als Material steht eine Auswahl an 4mm Acrylglas-, Kiefersperrholz- oder Hartfaserplatten für das Laserschneiden zur Verfügung. Als Strukturbauteile gibt es 20x20mm und 40x40mm Aluminium-Konstruktionsprofile mit Zubehör. Die Möglichkeit präzise Blechteile zu fertigen besteht nicht, da der verfügbare Laserschneider nicht für Blech geeignet und keine Abkantbank vorhanden ist.

Folglich stützt sich der Entwurf auf Aluminium-Konstruktionsprofile als Rahmenstruktur, Laserschneiden und Additive Fertigung für konstruierte Strukturbauteile und zugekaufte Materialien, wenn diese Notwendig sind.

6.3 Motorenauswahl

Schrittmotoren sind hier die naheliegendste Wahl. Der größte Faktor ist die Verbreitung von Schrittmotoren in kartesischen Robotern dieser Größe. Dies ergibt nicht nur eine sehr gute Verfügbarkeit der Motoren, sondern auch von zugehöriger Software und Hardware.

Weitere, entscheidende Vorteile sind:

- Geringe Kosten für die erreichbare Positionskontrolle
- Hohes Drehmoment, besonders bei geringen Geschwindigkeiten
- Simple Bauweise, Robustheit und Verlässlichkeit

Die größten Nachteile sind Vibrationen bei langsamen Geschwindigkeiten und Verlust von Drehmoment bei hohen Geschwindigkeiten. Hohe Geschwindigkeiten sind in dieser Anwendung jedoch nicht nötig und die erzeugten Vibrationen können durch elektronische Schrittteilung reduziert werden. Dies ergibt, neben der besseren Laufruhe, eine höhere Winkelauflösung, allerdings auf Kosten des verfügbaren Drehmoments - siehe Kapitel: 7.2.5 Schrittmotoren.

6.4 Antriebsart

Sowohl Antrieb über Zahnriemen als auch über Gewindespindeln kann, über Parameter wie Durchmesser der Zahnriemenscheiben oder Steigung der Spindel, an spezifische Bedürfnisse angepasst werden. Im Falle des Puzzlebots sind die Ansprüche an Genauigkeit und Geschwindigkeit weitaus geringer, als die der gewöhnlichen Portalroboter mit Bauteilfertigung als Verwendungszweck. Folglich kann sich bei der Auswahl der Antriebsart mehr auf andere Parameter gestützt werden.

Es wurde für alle Linearachsen der Zahnriemenantrieb gewählt – hauptsächlich aus konstruktiven Gründen. Näheres dazu in den folgenden Kapiteln zu den jeweiligen Achsen.

6.5 Entwerfen der Achskonzepte

Abb. 9 zeigt die konzeptuelle Ausarbeitung der Kinematik des Portalroboters in Draufsicht, welche in den folgenden Kapiteln näher erläutert wird.

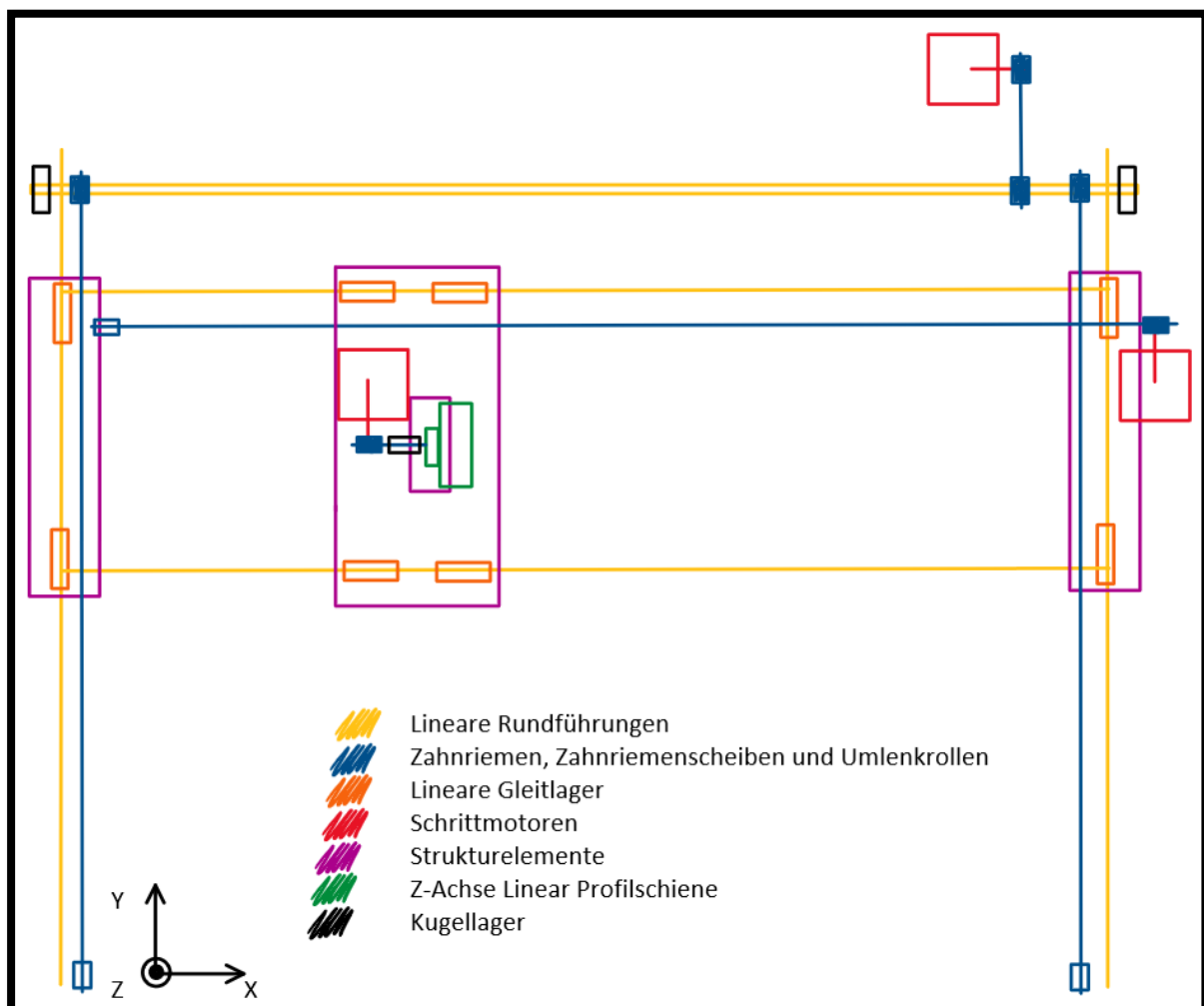


Abb. 9: Konzept Roboteraufbau Draufsicht

6.5.1 Konzept X-Achse

Die X-Achse besteht aus einem Schlitten, der als Plattform für die Z-Achse dient. Er wird geführt durch zwei Rundführungen und gelagert auf vier Linearen Gleitlagern. Angetrieben wird der Schlitten durch einen Riemenantrieb. Dessen Motor sitzt auf dem Schlitten der Y-Achse, um weniger Masse mitzuführen.

Während diese Achse auch gut als Spindelgetrieben ausgeführt werden könnte, ist der Riementrieb bei der Y- und Z-Achse vorzuziehen – weshalb hier ebenso Riemenantrieb gewählt wurde. Daraus ergibt sich auch eine kürzere Bauform der X-Achse, da die Kupplung und der Motor beim Spindeltrieb kollinear mit der Gewindespindel ausgeführt sein müssten.

6.5.2 Konzept Y-Achse

Beim Portalroboter werden beide Seiten der Y-Achse angetrieben, um eine flüssige Bewegung ohne Verkanten sicherzustellen. Mit Spindeltrieben würden hier zwei synchronisierte Motoren benötigt werden, weshalb auch hier Riemenantrieb gewählt wurde. Ein einzelner Motor ist parallel zur Antriebswelle montiert, welche mit zwei Kugellagern gelagert ist. Die Welle treibt über zwei Riemen die Schlitten der Y-Achse an, welche wiederum mit Gleitlagern auf Rundführungen geführt werden. Die Schlitten bieten Halterungen für die Komponenten der X-Achse.

6.5.3 Konzept Z-Achse

Für die Z-Achse wurde ein Riemensystem gewählt, bei dem Motor und Schlitten der Profilschiene fest mit dem Schlitten der X-Achse verbunden sind. Durch das Umlenken des Riemen über zwei Kugellager kann der Riemen an den Enden der Profilschiene befestigt werden. Am oberen Ende findet ein Riemenspannmechanismus Platz, der sich über eine Schraube von der Profilschiene abdrückt und somit Spannung im Riemen herstellt. Am unteren Ende der Profilschiene wird der Riemen gehalten und eine Adapterplatte montiert, an der der Endeffektor befestigt werden kann. Durch drehen des Motors kann somit die komplette Profilschiene bewegt werden, ohne die Masse des Motors mitzubewegen.

Dieses System erlaubt es den Endeffektor aus dem Bauraum zu heben, ohne dass Führungselemente der Z-Achse zurückbleiben. Um ein ähnliches

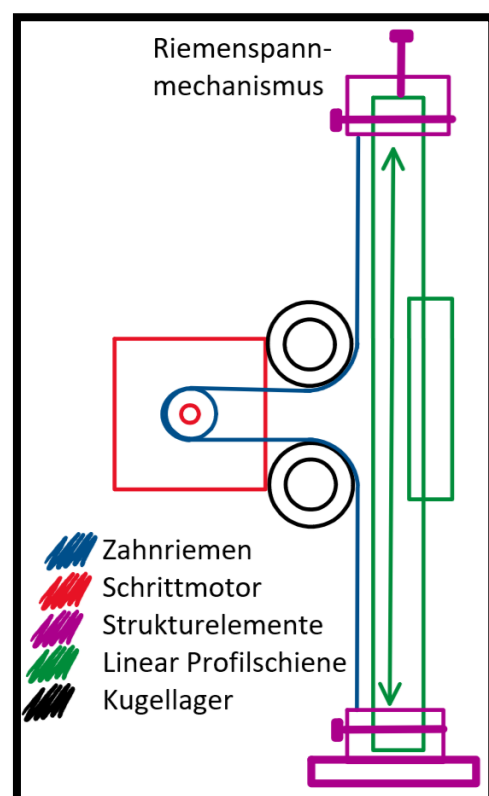


Abb. 10: Konzept Z-Achsenaufbau

System mit Spindelantrieb zu bauen, müsste die Masse des Z-Achsenmotors mit bewegt werden.

6.5.4 Konzept A-Achse und Endeffektor

Die rotatorische A-Achse besteht aus einem Schleifring, einen Hohlwellenschrittmotor und einem Elektromagneten. Die Kabel des Elektromagneten werden durch den hohlen Schaft des Schrittmotors geführt und mit dem Schleifring verbunden. Der Schleifring erlaubt eine Rotation der Magnetkabel, sodass die A-Achse kontinuierlich gedreht werden kann.

Am Schaft des Hohlwellenschrittmotors befindet sich wieder eine Adapterplatte, die das Montieren unterschiedlicher Endeffektoren erlaubt. Für den Fall des Puzzlebots wird ein gefederter Elektromagnet montiert, mithilfe dessen die Puzzleteile manipuliert werden können. Die Federung ist hilfreich, um kleine Höhenunterschiede auszugleichen – z. B. wenn zwei Puzzleteile leicht übereinander liegen.

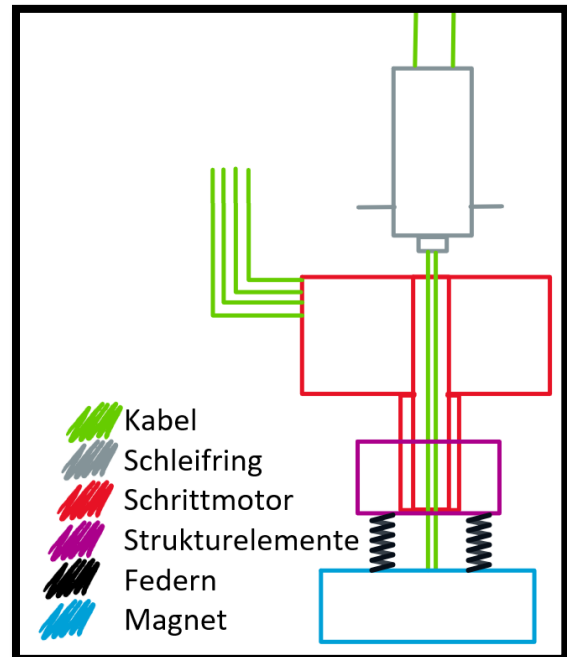


Abb. 11: Konzept A-Achse und Endeffektor

6.6 Konzeptentwicklung Informatik

Für die Ansteuerung des Roboters wurde eine numerische Steuerung gewählt, da dies in standardisierter Form als G-Code (General-Code) in der Industrie als auch im Hobbybereich Anwendung findet. Die Steuerung des Puzzlebots stimmt somit mit den CNC-Werkzeugmaschinen (Computer Numerical Control), Laserschneidern und FDM-Druckern überein. Dies ist ein entscheidender Punkt dieser Arbeit, da die entstehende Lehrplattform, neben Bilderkennung, auch Industrienähe Roboterkontrolle vermitteln soll.

6.6.1 G-Code

G-Code ist eine Programmiersprache, anhand derer CNC-Maschinen ihre Befehle erhalten. G-Code gibt es in vielen Varianten, die sich aber oft nur in den Details unterscheiden. Der ISO 6983 Standard findet häufig Anwendung, die DIN 66025 ist im deutschsprachigen Raum verbreitet.

Es gibt eine Vielzahl an G-Befehlen, mit denen die Werkzeugmaschine angesteuert und konfiguriert werden kann. Im Folgenden werden einige Beispiele genannt:

- G0 – Eilgang
- G1 – Geradliniger Vorschub
- G2 – Vorschub im Uhrzeigersinn
- G4 – Verweilzeit
- G41 – Werkzeugbahnkorrektur, links der Kontur in Vorschubrichtung
- G90 – Absolute Maßeingabe
- G91 – Relative Maßeingabe
- G94 – Vorschub in mm/min

Weiters gibt es M-Befehle (vom Englischen *miscellaneous*), anhand dessen Befehle z. B. die Spindel im Uhrzeigersinn (M3) oder Kühlmittel (M7) eingeschalten werden kann.

Eine Programmzeile, um eine Lineare Bewegung in Vorschubgeschwindigkeit auszuführen, könnte beispielsweise so aussehen:

G91 G1 X30 Y100 F3000

Diese Zeile schaltet in die relative Maßangabe und führt eine gerade Schnittbewegung mit 3000mm pro Minute aus – Startpunkt ist die aktuelle Position, Endpunkt 30mm in positiver X-Richtung und 100mm in positiver Y-Richtung.

6.6.2 G-Code Interpreter

Ein G-Code Interpreter ist das Empfangsgerät für G-Codes. Dessen Aufgabe besteht darin, den Code zu verarbeiten und in Befehle an die Aktuatoren des Systems umzuwandeln und weiter zu geben. Dies beinhaltet das Ansteuern der Schrittmotortreiber mit den definierten Beschleunigungs- und Geschwindigkeitsparametern, sowie die Ansteuerung anderer Aktuatoren, wie z. B. des Lasers, der Spindel, des Extruders oder des Heizbetts. Ebenso müssen Sensoren ausgelesen und gehandhabt werden – Endtaster für die Positionsbestimmung oder -begrenzung der Verfahrswege oder Temperatursensoren zur Überwachung der Heizelemente.

Die drei größten Open Source G-Code Interpreter Firmwares für generelle CNC-Maschinen sind Grbl, Smoothieware und g2core. FDM-Drucker benötigen speziellere G-Code Interpreter, da zusätzliche Funktionalitäten für die Filamentzufuhr und Extrudertemperatur benötigt wird. Ein bekannter Interpreter ist hierfür beispielsweise Marlin, einer Erweiterung des Grbl Interpreters.

Die verschiedenen Firmwares sind speziell auf bestimmte Mikrokontroller ausgelegt. So läuft Grbl auf Arduino Uno, Smoothieware auf eigenen Smoothieboards und g2core auf Arduino Due oder ebenso eigenen Synthetos v9 Boards.

6.6.3 G-Code Sender

Um den geschriebenen G-Code nun aus einer Datei zu extrahieren, in verarbeitbare Befehle zu unterteilen und an den G-Code Interpreter weiter zu leiten, wird ein G-Code Sender benötigt. Diese Programme übernehmen meist nicht nur das weiterleiten des G-Codes, sondern ermöglichen auch Zahlreiche andere Funktionen. Über deren GUI (graphical user interface) kann beispielsweise der Interpreter konfiguriert, Status der Maschine abgefragt und programmierter Pfad visualisiert und angepasst werden. Außerdem werden häufig verwendete Befehle oft durch das GUI erleichtert, wie z. B. händisches Verfahren der Achsen über Knöpfe oder Tastaturkürzel oder Auswerten der aktuellen Position.

Einige Beispiele für G-Code Sender sind Universal G-code Sender, bCNC, cncjs oder ChiliPeppr.

7 Ausarbeitung Komponentenebene

Die Folgenden Kapitel beschreiben auf Komponentenebene des V-Modells die Ausarbeitung der Mechanischen, Elektrischen und Softwaretechnischen Komponenten.

7.1 Ausarbeitung Mechanik

Im Folgenden Kapitel wird näher auf die Mechanischen Komponenten eingegangen und Funktion erläutert. Im Allgemeinen wurde bei der Ausarbeitung darauf geachtet, die Montage und Wartung der Teile möglichst einfach zu gestalten. Um die Belastbarkeit und Langlebigkeit der Bauteile zu verbessern, wurden stets Muttern in die additiv gefertigten Bauteile eingelegt, statt Gewinde in den weichen Kunststoff zu fertigen. Dafür wurden flache M3 und M4 Vierkantmutter der DIN 562 verwendet, da diese durch ihre Vierkantform einen besseren Halt gegen verdrehen in Nuten bieten.

7.1.1 Rahmenstruktur

Als Rahmenstruktur wurden 20x20mm Aluminium-Konstruktionsprofile gewählt, um eine 400x360x400mm (Länge, Breite, Höhe) große Grundstruktur zu schaffen. Diese standen, zusammen mit allem nötigem Zubehör, bereits zur Verfügung. Während die Rahmenstruktur eine gute Stabilität aufweist, ist durch die leicht unterschiedlichen Längen der einzelnen Konstruktionsprofile (bedingt durch Ungenauigkeiten beim Ablängen durch eine Kreissäge) geringer Verzug nicht auszuschließen.

Boden- und Rückwandplatte wurde aus weiß lackierten Hartfaserplatten gelasert und am Rahmen angebracht. Die Bodenplatte dient als Puzzleplattform, die Rückwand als Montagefläche für Netzgerät und andere Elektronik-Hardware.

7.1.2 Linearführungen

Als Linearführungen der X- und Y-Achse wurden Gleitlager mit passenden 8mm Rundführungen aus eloxiertem Aluminium der Firma Icus gewählt, da diese günstig, gut verfügbar und leicht zu verarbeiten sind. Zusätzlich wird das Rundführungsmaterial als Welle verwendet, siehe Kapitel 7.1.4.

Als Linearführung der Z-Achse wurde eine Miniatur-Profilschienenführung mit Schlitten (9mm Schienenbreite, 10mm Montagehöhe, 355mm Länge) gewählt. Diese liefert hohe Stabilität bei kleiner Bauform, inkludiert die Verdrehsicherung und erlaubt vielfältige Konstruktionsanbindungen durch vorgefertigte Bohrungen und Konturen.

7.1.3 Zahnriemen und Zubehör

Für die Zahnriemen wurde der GT2 (Gates Tooth, 2mm Zahnteilung) Standard gewählt – aufgrund der kleinen Bauweise und hohen Verfügbarkeit. Zusätzlich wurden Umlenkrollen und Zahnriemenscheiben mit 20 Zähnen gewählt.

Wie in Kapitel 7.2.6 Schrittmotortreiber näher beschrieben, können diese bis zu 16 Mikroschritte ausführen. Die gewählten Schrittmotoren (siehe Kapitel 7.2.5) haben einen Schrittwinkel von 1.8°, was 200 Schritte pro Umdrehung ergibt.

Mit folgender Formel lassen sich die Schritte pro Millimeter und die Auflösung berechnen.

$$\frac{\text{Motorschritte pro Umdrehung} * \text{Mikroschritte des Motortreibers}}{\text{Zahnteilung des Riemens} * \text{Anzahl der Zähne an der Zahnriemenscheibe}} = \frac{\text{Schritte}}{\text{mm}}$$

Beim Einsetzen in die Formel ergeben sich 80 Schritte pro Millimeter, was einer Auflösung von 12,5 Mikrometer entspricht.

7.1.4 X- und Y-Achse

Die Abb. 12 zeigt den Aufbau der X- und Y-Achsen. Die zwei Rundführungen der Y-Achse sind am Rahmen aufgehängt. Beide haben je einen angetriebenen Schlitten, auf dem die zwei Rundführungen, Umlenkrolle und der Motor mit Zahnriemenscheibe der X-Achse befestigt ist.

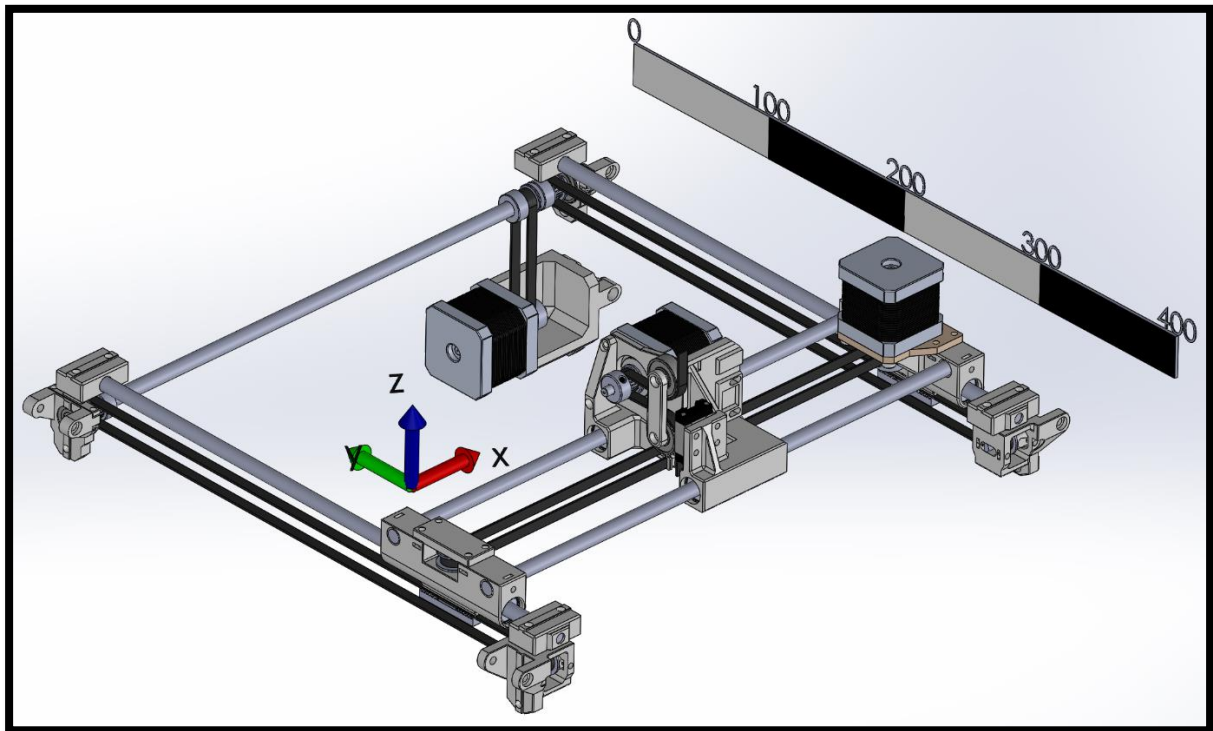


Abb. 12: Einzelbetrachtung X- und Y-Achse

Die Bewegung der beiden Y-Schlitten wird über eine Welle synchronisiert, welche von einem der Schrittmotoren angetrieben wird (Abb. 14). Auf der Welle, die aus demselben Stangenmaterial wie die Rundführung ist, sitzen somit drei Zahnriemenscheiben. Eine, um das Drehmoment von dem parallelen Schrittmotor auf die Welle zu übertragen und zwei weitere, um jeweils einen der Y-Schlitten anzutreiben. Die Welle ist über Kugellager an jedem Ende gelagert, welche in einer Halterung am Rahmen montiert ist. Die Halterung ist zweigeteilt, um für nachträgliches Entfernen der Welle nicht den Rahmen zerlegen zu müssen.

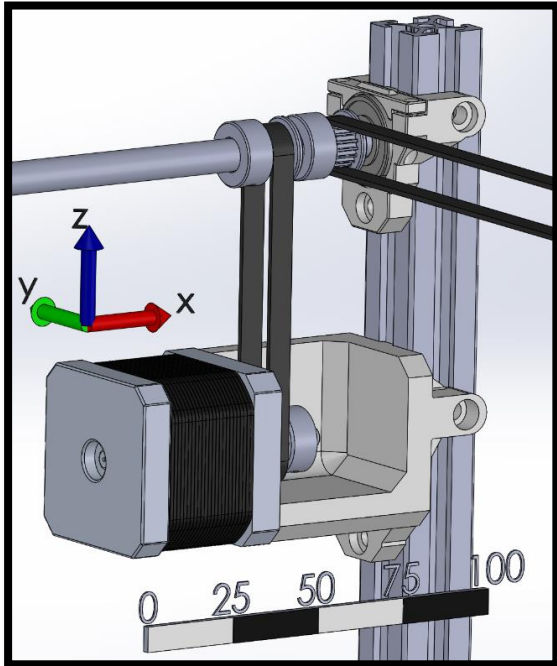


Abb. 14: Wellenantrieb Y-Achse

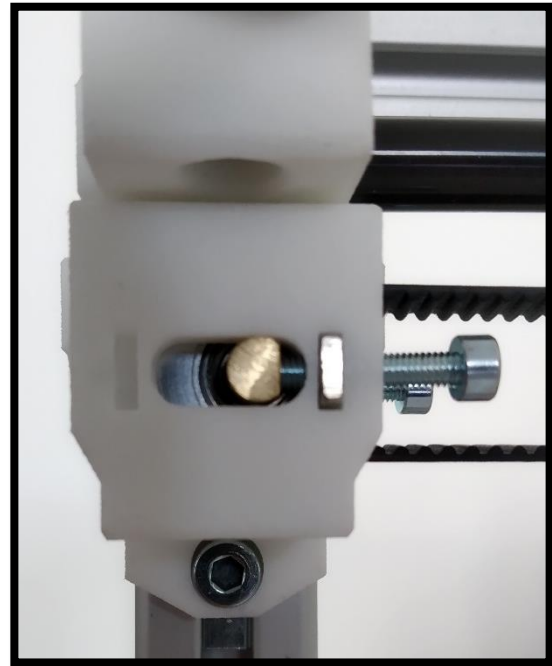


Abb. 13: Zahnriemenspanner Y-Achse

Das Zahnriemenspannsystem der Y-Achse (Abb. 13) ist symmetrisch ausgeführt, um für beide Seiten nutzbar zu sein. Dabei wird die Messingachse, auf der die Umlenkrolle des Zahnriemens montiert ist, mit zwei M3 Schrauben zurückgeschoben und spannt somit den Zahnriemen.

Für die Riemenspannung des X-Schlittens werden die Zahnriemenenden in die Zahnriemenspanner von Abb. 15 eingesetzt und mit Kabelbinder in deren Nut fixiert. Der vertikale Spanner wird fix am X-Schlitten montiert, während der horizontale durch M3x30mm Schrauben eines der Zahnriemenenden von der anderen Seite gegen den X-Schlitten spannt. Die zwei Versionen des Spanners sind dazu da, damit die sich Schrauben zum Spannen der Bauteile nicht kollinear sind und gegenseitig blockieren.

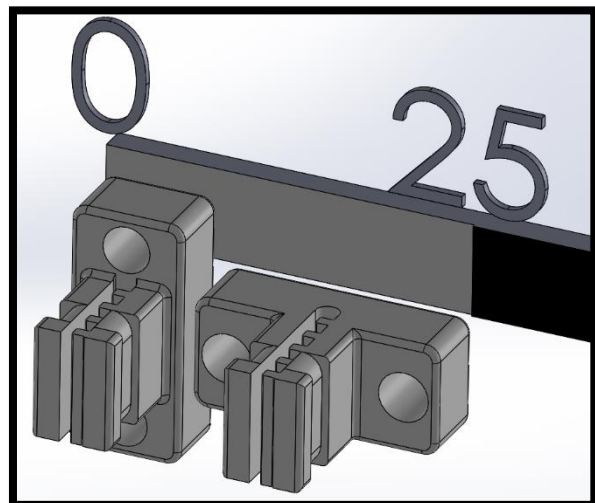


Abb. 15: Zahnriemenspanner X-Achse

7.1.5 Z-Achse

Die Z-Achse sitzt, inklusive Schrittmotor, direkt auf dem X-Schlitten (Abb. 16).

Ein Schrittmotor treibt einen Zahnriemen an, der über zwei Kugellager umgelenkt wird. Der Zahnriemen wird an den zwei Enden der Profilschiene an Halterungen fixiert. Die obere Halterung kann, wie in Abb. 16 zu sehen, mit einer M3 Schraube nach oben verschoben werden, in dem diese sich von der Profilschiene abstößt. Mit einer weiteren Schraube kann die Halterung in ihrer Position gehalten werden, sobald die Spannung des Zahnriemens eingestellt wurde. Der Schlitten der Profilschienenführung ist an dem X-Schlitten fixiert, während die Profilschiene selbst daran auf und ab fahren kann.

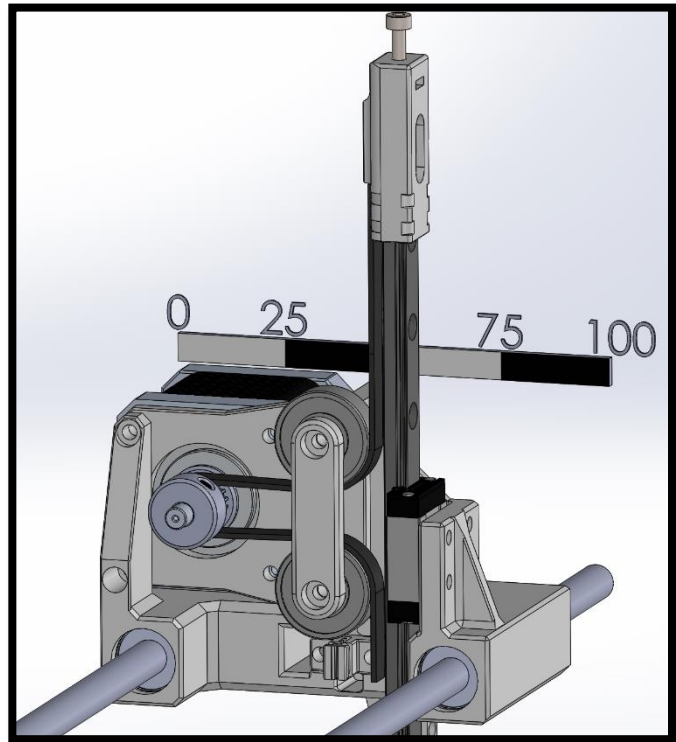


Abb. 16: Einzelbetrachtung Z-Achse

7.1.6 Endeffektor

Der Endeffektor (Abb. 17) besteht, von unten nach oben, aus einem Elektromagneten, einer Federung mit Führungsplatte, einem Schaftflansch, einem Hohlwellenschrittmotor, einem Schleifring mit dessen Adapter und dem Z-Achsen Flansch.

Der Elektromagnet wurde mit drei M3x30 Schrauben mit der Führungsplatte verbunden. Um die Schraubenschäfte wurde je eine 20x5,5mm Spiralfeder platziert, die den Elektromagneten von der Führungsplatte abdrücken. Die Schrauben können in der Führungsplatte nach oben gedrückt werden, wo sie nach 5,5mm Federweg an den Schaftflansch anstoßen. Dieser ist mit vier Schrauben am Hohlwellenschaft montiert. Der Hohlwellenschrittmotor ist am Schleifringadapter befestigt, welcher wiederum am Z-Achsen Flansch montiert ist. Der Verlauf der Kabel des Elektromagnets ist in Blau dargestellt. Der Schleifring erlaubt kontinuierliche Rotation des Elektromagneten, da somit keine Kabel verdreht werden.

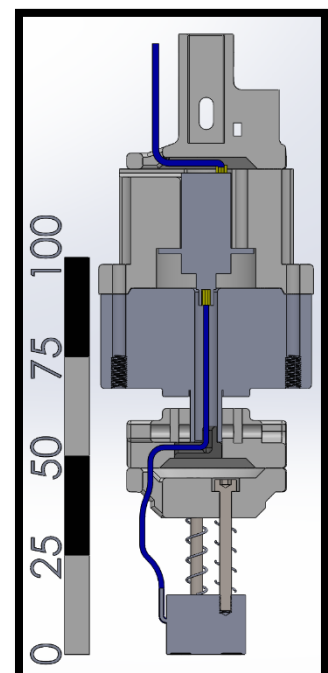


Abb. 17: Einzelbetrachtung Endeffektor: Schnitansicht

7.2 Ausarbeitung Elektrik

Im Folgenden werden die ausgewählten Elektronikkomponenten erklärt und begründet.

7.2.1 Raspberry Pi

Ein Raspberry Pi3 Modell B+ wurde zur Verfügung gestellt. Das Raspbian Stretch Betriebssystem wurde installiert. Der Raspberry Pi ist über eine Serielle Schnittstelle mit dem Arduino Mega 2560 verbunden und startet automatisch den in Kapitel 7.3.3 beschriebenen Serial Port JSON Server.

7.2.2 Kamera

Als Kamera steht ein Raspberry Pi Kamera Modul v1.3 5MP 1080p zur Verfügung. Diese kann über ein Flex-Kabel an dem CSI (Camera Serial Interface) Port des Raspberry Pi angeschlossen werden. Die Kamera verfügt einen fixierten Fokus und ist zu einer Standbildauflösung von 2592x1944 Pixeln sowie Videoaufnahme von 1920 x 1080 Pixel bei 30 Bildern pro Sekunde imstande.

7.2.3 Arduino Mega 2560 als G-Code Interpreter

Die Hardware des G-Code Interpreters wird durch die gewählte Firmware vorgegeben. Softwaretechnische Gründe für die Wahl der Grbl-Mega-5X Firmware werden in Kapitel „7.3 Ausarbeitung Informatik“ näher beschrieben.

Auch unter Betrachtung der Hardware liegt die Wahl von Grbl für den Puzzlebot nahe. Der Arduino Mega 2560 hat im Vergleich zu den speziellen Smoothieboards (Smoothieware Firmware) oder Synthetos v9 Boards (g2core Firmware) deutlich bessere Verfügbarkeit und Kosten. Lediglich der Arduino Due, der ebenso mit g2core funktioniert, kommt dem Arduino Mega 2560 gleich. Unter Betrachtung der ebenso notwendigen Motorshields (siehe Folgendes Kapitel) ist die Grbl Variante mit dem günstigen und weit verbreitetem RAMPS 1.4 (RepRap Arduino Mega Pololu Shield) erneut attraktiver.

7.2.4 RAMPS 1.4

Während das Verwenden von Motorshields nicht notwendig ist, erleichtert es den Verkabelungsaufwand enorm. Motorshields werden spezifisch für bestimmte Anwendungen geschaffen – im Falle des RepRap Arduino Mega Pololu Shield (RAMPS) um den Arduino Mega 2560 mit Pololu A4988 Schrittmotortreibern und weiteren FDM-Drucker relevanten Bauteilen zu bestücken.

Am RAMPS 1.4 können bis zu fünf Pololu A4988 Schrittmotortreiber, sechs Schrittmotoren (zwei davon synchron laufend), sechs Endschalter, drei Temperatursensoren, ein LCD-Display, ein SD-Kartenleser und drei 12V Verbraucher angeschlossen werden. Als

Stromversorgung existieren zwei 12V Eingänge, welche die Stromversorgung der Schrittmotortreiber, Motoren und Verbraucher übernehmen.

7.2.5 Schrittmotoren

Als Schrittmotoren für die X-, Y- und Z-Achse wurden NEMA 17 (National Electrical Manufacturers Association, amerikanische Normungsorganisation) Hybridschrittmotoren verwendet. Diese Bauform ist sehr verbreitet, was sich im Preis und deren Verfügbarkeit im Vergleich zu NEMA 11, NEMA 14 oder NEMA 23 widerspiegelt. Während NEMA 23 für die gewählten Treiber immer noch gut geeignet ist, ist das erhöhte Gewicht und die Baugröße dieser Motoren hinderlich, besonders da das erhöhte Moment dieser Motoren der gegebenen Anwendung nicht benötigt wird.

Die NEMA 17 liefern mit 1,7A Maximalstrom 40Ncm an Haltemoment, was durch die geringen Anforderungen an den Puzzlebot ausreichen ist.

Für die A-Achse wurde ein Hohlwellen-Hybridschrittmotor gewählt, um die Kabel durch dessen Hohlwelle zu führen. Da das benötigte Drehmoment der Rotationsachse ist sehr gering ist, konnte die Länge des Motors kleiner gewählt werden.

Durch Konfiguration der Schrittmotortreiber kann das Drehmoment der Motoren verändert werden. Geringe Maximalströme, einstellbar am Potentiometer der Schrittmotorentreiber, verringern den Stromverbrauch und die Wärmeentwicklung auf Kosten des Drehmoments der Motoren.

Ein weiterer Faktor des Drehmoments sind die Mikroschritte. Der A4988 Treiber kann auf Voll-, Halb-, $\frac{1}{4}$ -, $\frac{1}{8}$ -, und $\frac{1}{16}$ - Schritt eingestellt werden. Durch kleinere Schritte steigt die Auflösung. Dies verringert Lautstärke sowie Vibrationen und führt zu ruhigerem Lauf der Motoren. Die Genauigkeit wird dadurch aber nur bedingt besser, da das Haltemoment zwischen den einzelnen Mikroschritten schnell abnimmt [19].

7.2.6 Schrittmotortreiber

Für das RAMPS 1.4 stehen zwei Treiber zur Auswahl – die A4988 Treiber oder die etwas hochwertigeren DRV8825 Treiber.

Der Hauptunterschied zwischen den beiden Treibern ist, dass der A4988 nur für 2A maximale Stromstärke und maximal 16 Mikroschritte ausgelegt ist, während der DRV8825 2.5A und 32 Mikroschritte ermöglicht. Damit sind beide Treiber für die gewählten Schrittmotoren geeignet. Es wurden A4988 Treiber verwendet, da diese ca. 25% günstiger sind und bereits zur Verfügung standen.

Um die maximale Stromstärke der Schrittmotor einzustellen wird die Referenzspannung zwischen Masse und Potentiometer des jeweiligen Treibers gemessen. Anhand folgender Formel [20] kann daraufhin die Stromstärke berechnet werden.

$$I_{Max} = \frac{V_{Ref}}{8 \cdot R_{CS}}$$

Der Messwiderstand R_{CS} ist am Treiber abzulesen – in diesem Fall 0,050 Ohm.

Die Schrittmotortreiber wurden auf 1,125A und 16 Mikroschritte eingestellt, um einen ruhigen Lauf zu erzielen.

7.2.7 Elektromagnet

Für den Endeffektor wurde ein 12V, 2,5W Elektromagnet gewählt. Dieser hat mit einem Durchmesser von 20mm und einer Länge von 15mm eine Haltekraft von 20N.

7.2.8 Netzgerät

Als Netzgerät wurde ein gebrauchtes Lenovo FSP280-40EPA zur Verfügung gestellt. Dies hat einen permanenten Ausgang von 5,08V (2,5A) und zwei 12V Ausgänge (je 16A), wenn das Netzgerät aktiviert wird. Zum Aktivieren muss der PS_ON Pin (Grünes Kabel) mit Masse verbunden werden. Dies wurde mittels eines Kippschalters verwirklicht.

Das Netzgerät versorgt den Raspberry Pi mit 5,08V, sowie den Arduino Mega 2560 und die zwei Eingänge des RAMPS mit 12V.

7.3 Ausarbeitung Informatik

Im Folgenden werden die Informatikkomponenten ausgewählt, erklärt und begründet.

7.3.1 Grbl Ableger als G-Code Interpreter

Grbl in seiner Standardkonfiguration ist nur für drei Linearachsen für den Arduino Uno ausgelegt – X, Y und Z. Eine Erweiterung des Programmcodes auf mehrere Achsen ist dort nicht möglich, da der Arduino Uno trotz des hohen Optimierungsgrads bereits an seine baulichen Grenzen stößt. Allerdings wurden von aktiven Nutzern Ableger der Open Source Software erstellt, die auf dem Leistungsstärkeren Arduino Mega 2560 arbeiten.

Der Ableger Grbl-Mega-5X erlaubt das Hinzufügen von bis zu drei weiteren rotatorischen oder linearen Achsen, was eine Implementierung des Puzzlebots auf dieser Firmware ermöglicht. Es erlaubt nicht nur das Verfahren der vier Achsen des Puzzlebots in Standardkonfiguration, sondern ermöglicht auch zukünftige Erweiterungen der Lehrplattform. Die zusätzlichen zwei Achsen könnten gegebenenfalls für Manipulation der Kamera oder Endeffektoren genützt werden.

Andere Gründe für die Wahl von Grbl-Mega-5X sind die Anbindung an ChiliPeppr und in der in Kapitel 7.2.3 genannten Vorteile bei der Auswahl der Hardware.

7.3.2 ChiliPeppr als G-Code Sender

Während die meisten G-Code Sender installierbare Programme sind, nimmt ChiliPeppr eine andere Rolle ein. ChiliPeppr ist eine Website, auf der man unterschiedliche Arbeitsplätze erstellen kann, um die Serielle Schnittstelle von lokaler Hardware über die Seite anzusprechen. Dabei können vorgefertigte Arbeitsplätze, Arbeitsplätze von anderen Nutzern oder eigene genutzt werden. Dadurch, dass die Anwendung im Browser läuft, ist kein Herunterladen eines Programms von dieser Seite her notwendig. Der Kern von ChiliPeppr ist ein Serial Port JSON (JavaScript Object Notation) Server, der die Serielle Schnittstelle eines Geräts und den Host des Servers, beispielsweise ein Raspberry Pi, mittels WebSockets mit dem Browser verbindet.

Für die Nutzung von Grbl stehen bereits Arbeitsplätze bereit [21], die einzelnen Funktionen sind durch Widgets implementiert (siehe Abb. 18). Eine Ansteuerung durch ChiliPeppr ist somit für den Puzzlebot gegeben. Durch bearbeiten des Arbeitsplatzes können weitere Funktionen hinzugefügt oder entfernt werden. Dies ist für diese Lehrapplikation besonders interessant, da z. B. dem Arbeitsplatz ein Kamera Widget [22] hinzugefügt werden könnte – oder verschiedene Arbeitsplätze für unterschiedliche Nutzer geschaffen werden könnten. Vorstellbar wäre ein Arbeitsplatz für Studenten ohne Widgets, die das Manipulieren des Roboters erlauben – während der Arbeitsplatz des Lehrenden volle Zugriffsrechte hat. Die Anwendung durch den Browser unterstützt das gleichzeitige Verbinden mehrerer Instanzen mit dem Server.

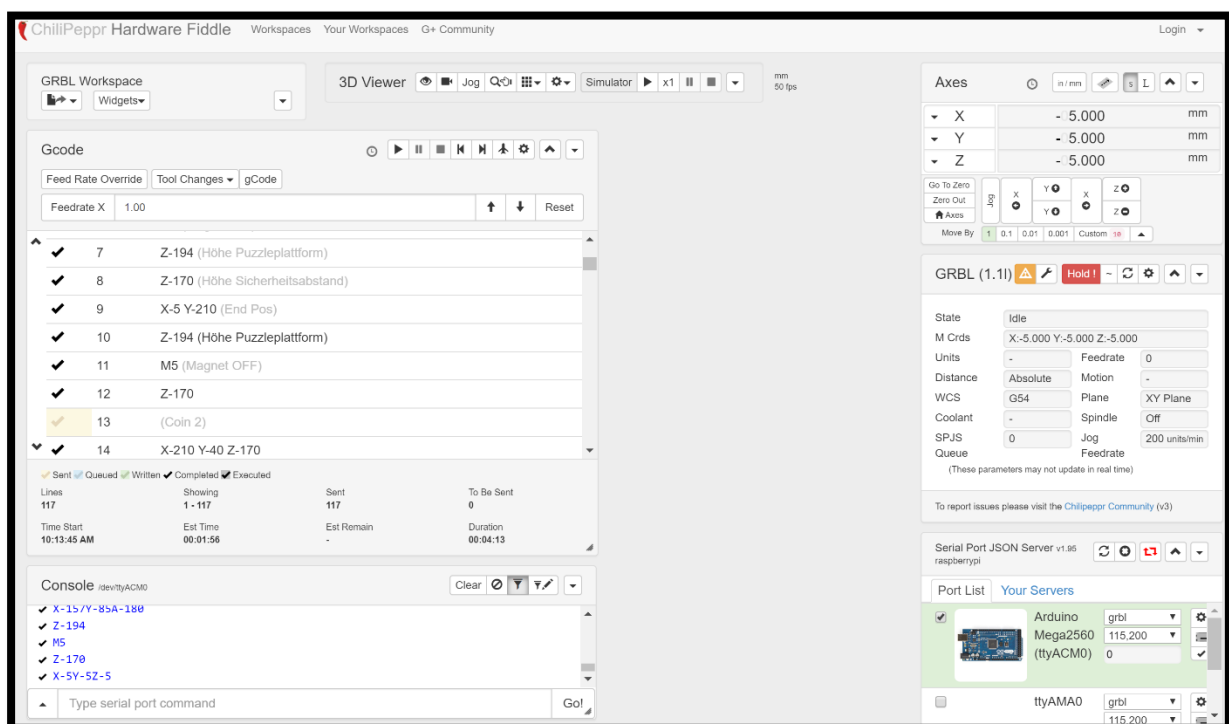


Abb. 18: ChiliPeppr GUI mit einzelnen Widgets

7.3.3 Serial Port JSON Server

Der Serial Port JSON Server ist für ChiliPeppr notwendig, um eine Verbindung zum Arduino herzustellen. Dafür wurde der Server am Raspberry Pi über den Terminal-Befehl „`wget serial-port-json-server-1.95_linux_arm.tar.gz`“ heruntergeladen. Nach Entpacken der Dateien wurde mit „`sudo ./serial-port-json-server -createstartupscript`“ und „`sudo /etc/init.d/serial-port-json-server start`“ das automatische Starten des Servers beim Hochfahren des Raspberry Pi sichergestellt.

Neben der Verbindung zwischen Weboberfläche und Arduino übernimmt der Server auch eine Bufferfunktion. Damit lassen sich bis zu 20000 Zeilen G-Code auf dem Server buffern, der somit auch bei Verbindungsproblemen zwischen Weboberfläche und Server stets den Arduino mit Befehlen versorgen kann.

7.4 Informationsfluss des Puzzlebots

In Abb. 19 ist der Informationsfluss der Ansteuerung des Puzzlebots zu sehen. Hierbei wird G-Code, beispielsweise durch eine Textdatei, in den G-Code Sender geladen, welcher diese dann sendet. Alternativ kann G-Code auch in der ChiliPeppr GUI durch schreiben in der Konsole oder durch GUI-Elemente erzeugt und gesendet werden. Der Serial Port JSON Server nimmt diese Befehle entgegen und buffert diese gegebenenfalls. Daraufhin werden einzelne Befehle an den G-Code Interpreter gesendet. Dieser meldet zurück, sobald er bereit für weitere Befehle ist. Der G-Code Interpreter steuert nun die Motoren und Aktuatoren des Systems.

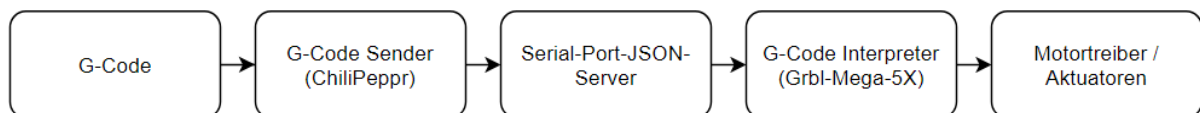


Abb. 19: Informationsfluss Ansteuerung mittels ChiliPeppr

Der Informationsfluss der Kamera wird in Abb. 20 gezeigt. Die Kamera ist an den Raspberry angeschlossen, auf dem ein MJPEG (Motion JPEG) Server installiert ist. Dieser streamt die Kameraansicht an das ChiliPeppr Widget.

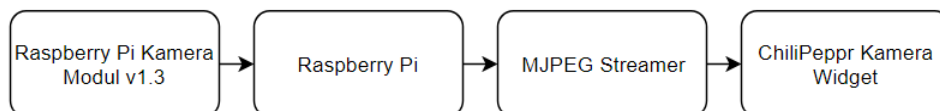


Abb. 20: Informationsfluss Kamera

8 Ergebnisse und Diskussion

Der in Abb. 21 zu sehende Portalroboter ist das Ergebnis dieser Arbeit. Er ist imstande über das Anfahren von drei Endscharter einen Homing-Zyklus durchzuführen, bei dem er seine X-, Y- und Z-Koordinaten Nullsetzen kann. Die rotatorische A-Achse des Endeffektors kann kontinuierlich gedreht werden und benötigt dadurch keine Limitierung. Das Verfahren der Achsen geschieht nach CNC-Konvention in Negativ-Richtung. Mit dem derzeit montiertem Endeffektor ergeben sich verfahrbare Achslängen von $X=215\text{mm}$, $Y=225\text{mm}$ und $Z=200\text{mm}$. Diese Limitierung wird von der Software überwacht, sodass keine Kollision aufgrund von überschreiten der Verfahwege passieren kann.

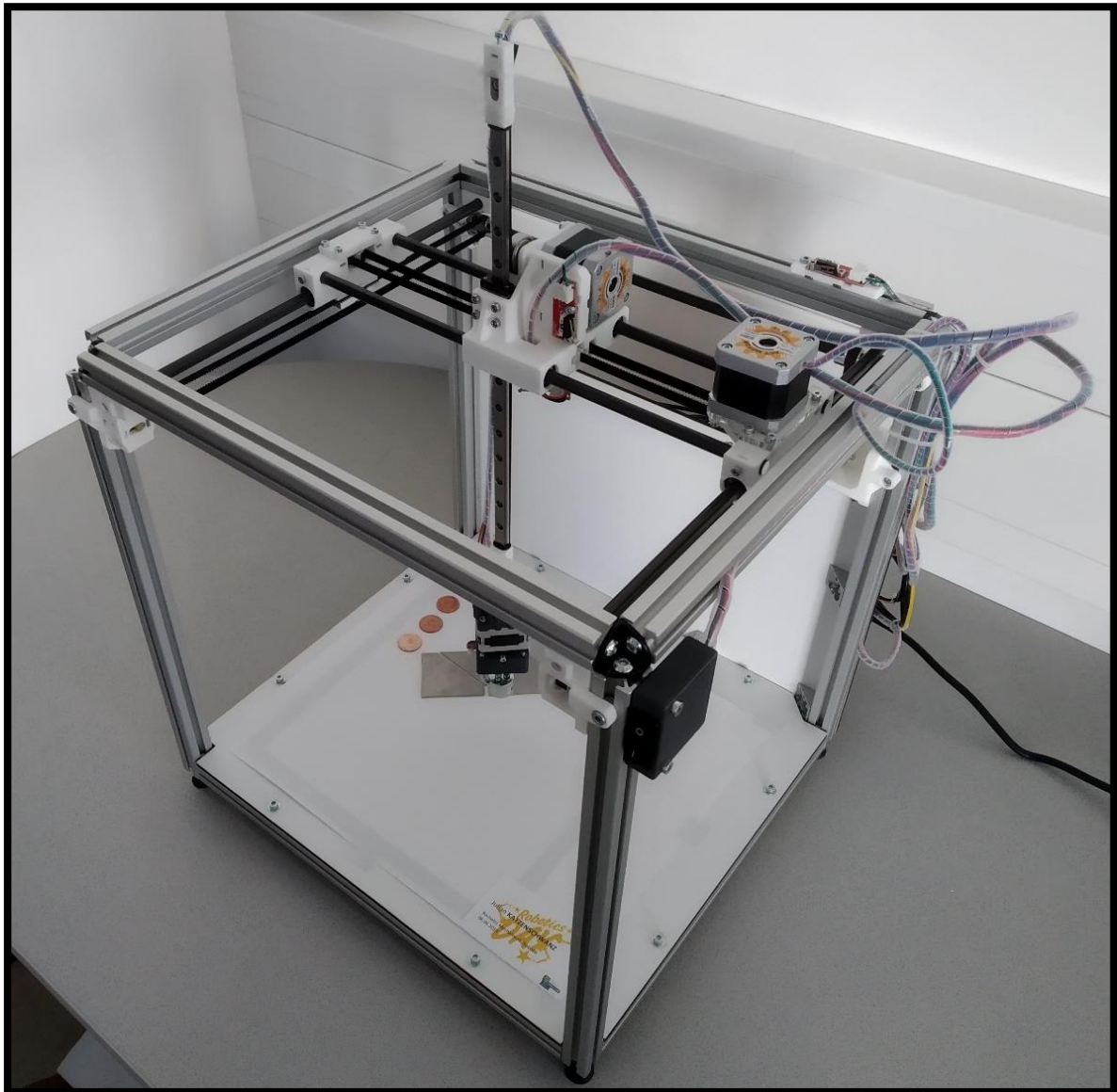


Abb. 21: Puzzleroboter isometrische Gesamtansicht

Der Endeffektor verfügt über einen Federweg von 5,5mm, was zusätzliche Sicherheit und Flexibilität in der Z-Achse sicherstellt. Damit können Anwenderfehler in der Wahl der Z-Koordinaten, wie z. B. nichtbeachten der Puzzleteilstärke oder mehrere übereinanderliegende Puzzleteile, ausgeglichen werden. Falls es in den translatorischen Achsen dennoch zu Kollisionen kommt, führt dies zu einer Kombination aus Schrittverlust der Motoren und Durchrutschen der Zahnriemen auf der Zahnriemenscheibe. Dies bewirkt einen Positionsverlust des Roboters, der durch einen automatischen Homing-Zyklus wieder leicht behoben werden kann. Kollisionen führen in der Regel zu keinen Schäden an diesem Roboter, da die Schrittmotoren und Zahnriemen als Rutschkupplung bei zu hohen Drehmomenten fungieren – lediglich zu einer höheren Abnutzung, hauptsächlich die des Zahnriemens.

Die Endeffektorhalterung, wahlweise mit oder ohne Rotationsachse, ist modular aufgebaut. Die verwendeten Flanschmaße entsprechen den von NEMA 17 Schrittmotoren, mit einem Lochabstand von je 31mm für M3 Schrauben. Der Schleifring bietet eine Kabeldurchführung von 12 Polen. Dies ermöglicht Flexibilität beim Wechseln der Endeffektoren, sollten zukünftige Änderungen dies verlangen.

Der Roboter verfügt über einen Kippschalter, der die 12V Generation des Netzgeräts steuert. Dadurch können die Aktuatoren des Roboters einfach stromlos geschaltet werden, um beispielsweise den Roboter händisch zu bewegen, ohne die Steuerung ebenso deaktivieren zu müssen.

Der Endeffektor weist ein hohes Spiel in Nähe der Puzzlefläche auf, verstärkt durch die Länge der ausgelenkten Z-Achse. Dies ist hauptsächlich bedingt durch ein Spiel zwischen den Gleitlagern und dem Schlitten der X-Achse – aber auch durch die Flexibilität der verwendeten Polyamid SLS-Strukturbauteile, sowie die der Aluminium-Rundführungen.

Während das Spiel mit $\pm 2\text{mm}$ in X-Richtung und $\pm 4\text{mm}$ in Y-Richtung beträchtlich ist, fällt es im praktischen Puzzlebetrieb nur wenig ins Gewicht. Der Großteil dieses Spiels tritt nur auf, wenn der gesamte X-Schlitten angehoben wird. Im Puzzlebetrieb treten solche Querkkräfte bei dem Aufnehmen und Ablegen der Puzzleteile in der Regel nicht auf, da in solchen Pick and Place Anwendungen zu diesen Zeitpunkten keine Beschleunigungen in X-Y-Ebene stattfinden dürfen, lediglich in Z-Richtung.

Unter Beachtung der Regel, dass genaues Aufnehmen und Ablegen nur unter Verwendung der Z-Achse auszuführen sind, ist eine Wiederholgenauigkeit $<1\text{mm}$ zu erreichen.



Abb. 22: Wiederholgenauigkeitsanalyse

Zum Testen der Wiederholgenauigkeit wurden drei 5 Euro-Cent-Münzen auf die Koordinaten ***X-210 Y-10***, ***X-210 Y-40*** und ***X-210 Y-70*** gelegt und mit einem Kreis umrandet. Durch ein G-Code Programm wurden die Münzen einzeln respektive auf ***X-5 Y-210***, ***X-5 Y-180*** und ***X-5 Y-150*** gebracht und abgelegt. Anschließend wurden die Münzen erneut vom Roboter aufgenommen und einzeln auf die Ausgangsposition zurückgelegt, was in Abb. 22 dargestellt ist. Es ist zu sehen, dass die Abweichung der Münzen vom Kreis unter einem Millimeter ist.

Der Roboter wurde mit Maximalgeschwindigkeiten von 250mm/s und Beschleunigungen von 800mm/s^2 betrieben, was gute Ergebnisse erzielte. Auch höhere Werte sind problemlos möglich, wenn die maximale Stromstärke der Schrittmotortreiber erhöht wird, um Schrittverluste bei den Beschleunigungsvorgängen zu vermeiden. Die maximale Stromstärke der Treiber wurde auf $1,125\text{A}$ eingestellt, könnte aber bis auf $1,7\text{A}$ erhöht werden (Limit der gewählten Schrittmotoren). Allerdings steigt damit die Wärmeentwicklung der Motortreiber, wodurch eine aktive Kühlung durch einen Lüfter ratsam wird. Dies ist im Design mit vorgesehen – ein $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 12V Lüfter kann in der Abdeckung des RAMPS montiert und mit den freien 12V und Masse Pins der Blockklemme verbunden werden.

Ein weiteres Ergebnis ist die vollständige, maßgetreue Projektdokumentation in Form eines CAD-Modells (Computer-Aided Design). Dies wurde in SolidWorks 2018 erstellt und beinhaltet die Positionen und Maße aller relevanten Bauteile des echten Roboters.

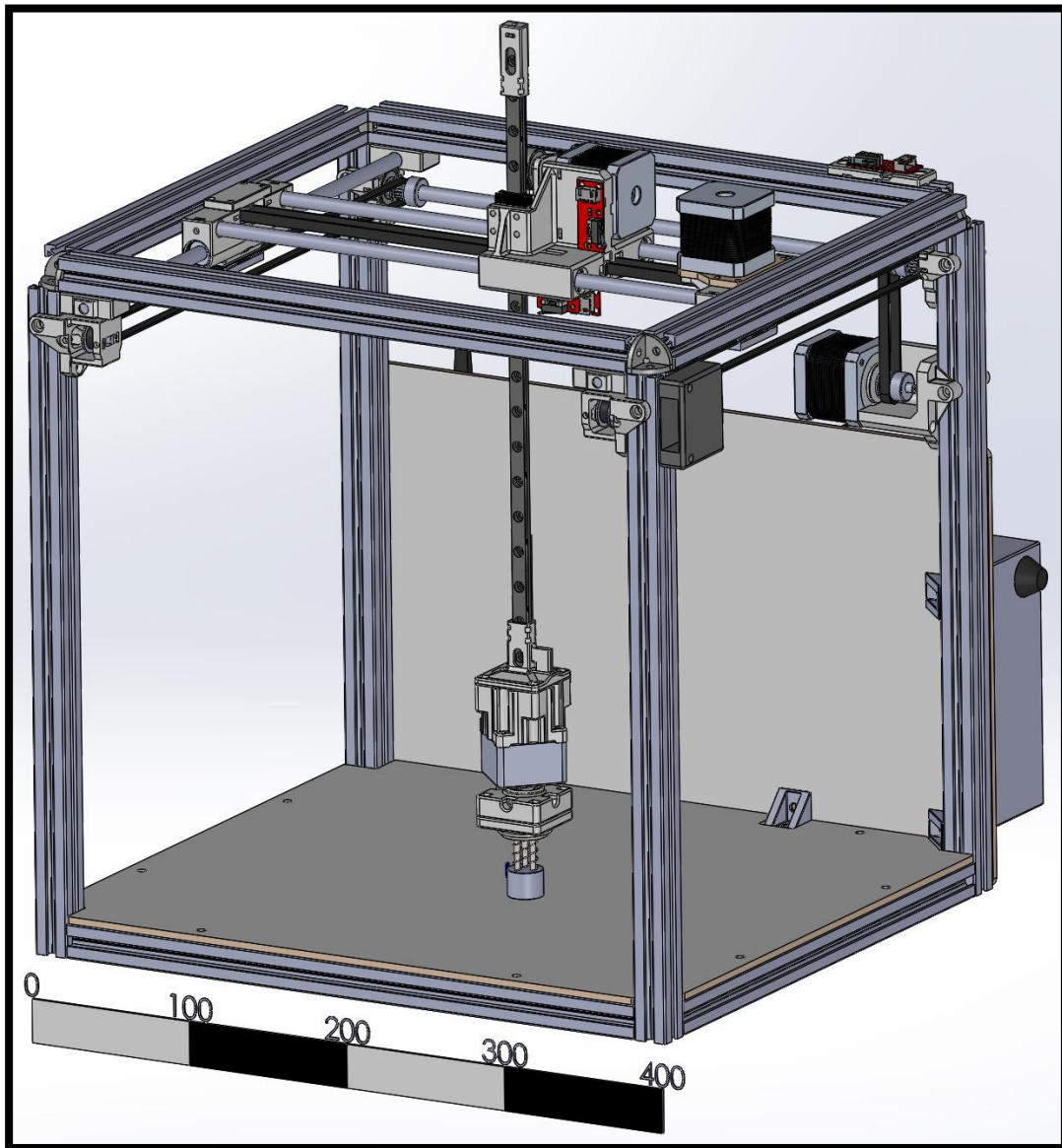


Abb. 23: CAD-Modell des Puzzleroboters

Für die Ansteuerung des Roboters kann im Netzwerk über ChiliPeppr eine Verbindung mit dem Raspberry Pi aufgebaut werden, wodurch drahtloses Konfigurieren und Steuern des Roboters mittels G-Code Programmen und Befehlen möglich wird. Dies ist ideal zum Testen und Vorführen des Roboters, erlaubt in dieser Konfiguration aber keinen Zugriff von Computern außerhalb des Netzwerks, da Lösungen, wie Port Forwarding oder Remoteverbindungen, von dem zur Verfügung gestelltem Netzwerk nicht erlaubt sind. Mehr dazu im Ausblick dieser Arbeit.

9 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Demonstrator konzipiert und entwickelt, der in fertiger Ausführung als Online Lehrplattform dienen soll, um Nutzern eine praktische Anwendung von Bilderkennung und Roboterkontrolle zu bieten. Die Entwicklungsarbeit hielt sich an das Drei-Ebenen-Vorgehensmodell nach Bender. Dabei wurde besonders auf die Unterteilung in System-, Subsystem- und Komponentenebene, als auch auf den Mechanik-, Hardware- und Softwarestränge wertgelegt. Kombiniert wurde das Vorgehensmodell mit einer Vereinfachung des agilen Rahmenwerks von Scrum, was die angewendete Organisations- und Kommunikationsart maßgeblich formte. Dies wurde mithilfe des Projektmanagementtools Trello umgesetzt und in Form von Karten und Checklisten festgehalten. Diese systematische Vorgehensweise trug maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit bei.

Das ursprüngliche Systemkonzept der Candy Grabbers wurde mit einem eigens erarbeiteten verglichen und zugunsten des Puzzlebots verworfen, da dieser deutlich besser für die Anwendung geeignet ist und mehr Potential für zukünftige Erweiterungen bietet.

Alle notwendigen Subsysteme wurden analysiert und konzeptioniert, unter Beachtung der gegebenen Rahmenbedingungen. Anschließend wurde auf Komponentenebene der Puzzlebot näher ausgearbeitet. Vorhandene Komponenten wurden evaluiert, fehlende Fertigteile bestellt und die restlichen Bauteile in CAD konstruiert und gefertigt. Das Ergebnis ist ein fertiger Portalroboter mit kontinuierlich rotierbarem Elektromagnet als Endeffektor, zur Manipulation von ferromagnetischen Puzzleteilen. Die Ansteuerung erfolgt nach Industriestandard über G-Code, einer numerischen Programmiersprache für CNC-Maschinen.

10 Ausblick

Während diese Arbeit einen soliden Grundstein für eine einsatzfähige online Lehrplattform legt, fehlt Softwareseitig die Implementierung der Kamera und einer nutzbaren, sicheren Onlineanbindung. Im Falle der Kamera kann der Raspberry Pi dazu genutzt werden diese per MJPEG Stream online zu stellen. Die Onlineanbindung kann über einen OPC-UA Server (Open Platform Communications, Unified Architecture) am Raspberry Pi vorgenommen werden. Dabei können eingegebene Daten, z. B. X-, Y- und Z Koordinaten in G-Code umgewandelt und an die serielle Schnittstelle des Arduino Mega 2560 weitergeleitet werden.

Auf Seite des Portalroboters ist eine Erweiterung durch einen Lüfter ratsam, um die Temperatur der Hardware auch bei höheren Strömen in den Motortreibern niedrig zu halten. Weiters ist eine konstruktive Änderung an den Schlitten der X- und Y-Achsen ratsam, um das Spiel zwischen Schlitten und den Gleitlagern zu eliminieren. Ein leichter Presssitz der Lager wäre ideal, allerdings sollte dieser ohne Nachbearbeitungsschritt geschehen, um die Kollinearität der Lagersitze gewährleisten zu können. Andernfalls erhöht sich die Reibung auf den Rundführungen stark. Um das ideale Maß des Lagersitzes zu ermitteln, könnten mehrere Versuchsmuster mit dem SLS-Drucker hergestellt werden, bevor komplett neue Schlitten gedruckt werden. Nach verbessern des Spiels im Endeffektor sind ausführlichere Tests zur Absolut- und Wiederholgenauigkeit des Gesamtsystems empfehlenswert.

Für die Fertigstellung der Lehrplattform könnte weiters auch an zusätzlichen Puzzles, sowie dem Erstellen einer Bedienungs- und Übungsanleitung gearbeitet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] S. Jorda, „Viel Forschung, wenig Praxis“, *Phys. J.*, Bd. 13, Nr. 5, S. 8, 2014.
- [2] T. Roth, R. Kirsch, C. Greß, A. Schwingel, U. Hein, und J. Appel, „Authentische Anwendungsbeispiele für eine praxisorientierte Lehre in MINT-Fächern“, 2014.
- [3] R. Wengenmayr, „Wunsch und Wirklichkeit – Multimedia-Lehrmittel im Physikstudium“, *Phys. Blätter*, Bd. 57, Nr. 3, S. 25–29, 2001.
- [4] J. Kirstein, „IBE Produktionen zum Ausprobieren“. [Online]. Verfügbar unter: <http://didaktik.physik.fu-berlin.de/projekte/ibe/beispiele/index.html>. [Zugegriffen: 12-Mai-2019].
- [5] „Labster | Award Winning Virtual Lab Simulations“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.labster.com/>. [Zugegriffen: 12-Mai-2019].
- [6] „Open MINT Labs“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.openmintlabs.de/#top>. [Zugegriffen: 12-Mai-2019].
- [7] T. Roth, A. Schwingel, C. Greß, U. Hein, R. Kirsch, und J. Appel, „Vorstellung eines Blended-Learning-Lab-Konzeptes für die Grundlagenlabore in MINT-Fächern“.
- [8] S. Gröber, „Experimentieren aus der Ferne (RCL-Projekt an der Technischen Universität Kaiserslautern)“, Technischen Universität Kaiserslautern, 2011.
- [9] S. Gröber, „RCL-Prinzip und Allgemeiner Mehrwert“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lehrer-online.de/artikel/seite/fa/remotely-controlled-laboratories-rcls/rcl-prinzip-und-allgemeiner-mehrwert/>. [Zugegriffen: 15-Apr-2019].
- [10] „RCL-Projekt“, *Universität der Bundeswehr München*. [Online]. Verfügbar unter: <http://rcl-munich.informatik.unibw-muenchen.de/>. [Zugegriffen: 10-Juni-2019].
- [11] H. A. Johnson, MLIS, „Trello“, *J. Med. Libr. Assoc.*, Bd. 105, Nr. 2, S. 299, Apr. 2017.
- [12] K. Bender, *Embedded Systems - qualitätsorientierte Entwicklung*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [13] A. Böge, „H Grundlagen der Mechatronik“, in *Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*, A. Böge, Hrsg. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, S. 511–544.
- [14] A. Srivastava, S. Bhardwaj, und S. Saraswat, „SCRUM model for agile methodology“, *Proceeding - IEEE Int. Conf. Comput. Commun. Autom. ICCCA 2017*, Bd. 2017-Janua, S. 864–869, 2017.
- [15] K. Schwaber und J. Sutherland, „The Scrum Guide: The Definitive The Rules of the Game“, *Scrum.Org and ScrumInc*, Nr. November, S. 19, 2017.
- [16] Scrum Alliance, „The State of Scrum: Benchmarks and Guidelines“, *Scrum Alliance*, Nr. June, S. 48, 2013.
- [17] „Candy Grabber“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.amazon.de/Gadgy-Stummschaltungstaste-Süßigkeiten-Greifmaschine-Spielautomat/dp/B0122WDSMK>. [Zugegriffen: 07-Juni-2019].

- [18] „FH Technikum Wien Logo“. [Online]. Verfügbar unter: <https://cis.technikum-wien.at/cms/dms.php?id=744>. [Zugegriffen: 10-Juni-2019].
- [19] Micromo, „Stepper Motor Technical Note: Microstepping Myths and Realities“, *White Pap.*, S. 1–4, 2014.
- [20] „Pololu A4988 Motortreiber“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.pololu.com/product/1182>. [Zugegriffen: 02-Juni-2019].
- [21] „Chilipeppr Grbl 1.1 Workplace“. [Online]. Verfügbar unter: <http://chilipeppr.com/jpadie>. [Zugegriffen: 25-Mai-2019].
- [22] „Chilipeppr Camera Widget“. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/xpix/widget-cam>. [Zugegriffen: 28-Mai-2019].

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Baustein-Konzept der Open MINT Labs [7]	2
Abb. 2: Windkanal RCL des RCL-Projekts [10].....	3
Abb. 3: Unterteilung in Meilensteine, Arbeitsbereiche und Arbeitspakete	4
Abb. 4: Drei-Ebenen-Vorgehensmodell nach Bender [12]	5
Abb. 5: Candy Grabber [17].....	8
Abb. 6: Funktionsmodell Candy Grabber	9
Abb. 7: Beispiel eines dreiteiligen geometrischen Puzzles [18].....	9
Abb. 8: Funktionsmodell Puzzlebot	10
Abb. 9: Konzept Roboteraufbau Draufsicht.....	13
Abb. 10: Konzept Z-Achsenaufbau	14
Abb. 11: Konzept A-Achse und Endeffektor.....	15
Abb. 12: Einzelbetrachtung X- und Y-Achse.....	19
Abb. 13: Zahnriemenspanner Y-Achse.....	20
Abb. 14: Wellenantrieb Y-Achse	20
Abb. 15: Zahnriemenspanner X-Achse.....	20
Abb. 16: Einzelbetrachtung Z-Achse	21
Abb. 17: Einzelbetrachtung Endeffektor: Schnittansicht.....	21
Abb. 18: ChiliPeppr GUI mit einzelnen Widgets.....	25
Abb. 19: Informationsfluss Ansteuerung mittels ChiliPeppr.....	26
Abb. 20: Informationsfluss Kamera.....	26
Abb. 21: Puzzleroboter isometrische Gesamtansicht.....	27
Abb. 22: Wiederholgenauigkeitsanalyse	29
Abb. 23: CAD-Modell des Puzzleroboters	30

Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer-Aided Design
CNC	Computer Numerical Control
CSI	Camera Serial Interface
FDM	Fused Deposit Modeling
G-Code	General Code
GUI	Graphical User Interface
IBE	Interaktive Bildschirmexperimente
JSON	JavaScript Object Notation
M-Code	Miscellaneous Code
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
OML	Open MINT Labs
OPC-UA	Open Platform Communications - Unified Architecture
RAMPS	RepRap Arduino Mega Pololu Shield
RCL	Remote Controlled Laboratories
SLS	Selektives Laser Sintern