



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Institut für
Fertigungstechnik und
Hochleistungslasertechnik



Diplomarbeit

EGSE für einen Hexapod

Entwicklung und Bau eines EGSE für eine sechs-Achsen-
Parallelkinematik zur Anwendung in der Raumfahrt

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Master of Science unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dipl. Ing. Dr. Bleicher

(Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Bernhard Dellinger

0826454 066445

Preiseckergasse 12

3420 Kritzensdorf

Wien, im März 2017

Bernhard, Dellinger

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und, dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im März 2017

Bernhard, Dellinger

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei Herrn Professor Bleicher für seine Unterstützung und seine konstruktive Kritik im Werde-Prozess dieser Arbeit bedanken. Ich möchte mich auch bei Herrn Dipl.-Ing. Habersohn für das wiederholte Lesen bedanken und dafür, dass er mir geholfen hat, aus einem rohen Konzept eine wissenschaftliche Arbeit zu machen.

Mein Dank geht auch an die Firma RUAG Space Austria und an Herrn Dipl. Ing. Neugebauer für die Chance, diese Arbeit zu schreiben. Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Supper bedanken. Ohne ihn wäre die technische Umsetzung dieser Arbeit nicht möglich gewesen, da er mich sehr häufig auf neue Ideen gestoßen hat. Das Konzept der elektrischen Hardware ist bei RUAG Space im Wesentlichen in Zusammenarbeit mit Herrn Supper entstanden.

Ich möchte mich bei meinem guten Freund Thomas Rauhofer und seinem Kollegen Herrn Watzek bedanken, die gegen Ende der Arbeit viel Zeit und Energie darauf verwendet haben, meine rudimentären Ideen von einem Programm in lauffähigen Code zu verwandeln. Ohne Herrn Rauhofer wäre es mir vermutlich nicht möglich gewesen, die Programmierung zu realisieren.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner Familie für die Unterstützung während des gesamten Studiums bedanken. Ganz besonderer Dank gilt meiner Verlobten Adelheid Schöbitz, die während der letzten Jahre in diesem Studium viele Höhen und Tiefen mitgemacht hat und sich wiederholt dazu bereit erklärt hat Rechtschreibung und Beistriche der Arbeit zu kontrollieren und auszubessern.

Kurzfassung

Hexapoden, oder auch Stewart-Gough-Plattformen, bieten die Möglichkeit sich in allen sechs Freiheitsgraden im Raum, mit einer leichten und steifen Struktur, zu bewegen. Sie eignen sich daher für viele Anwendungen bei denen geringe Masse und Präzision entscheidend sind. Das Unternehmen RUAG Space Austria entwickelt zurzeit eine derartige sechs-Achsen-Parallelkinematik, für den Betrieb in einem orbital operierenden Spiegelteleskop. Der Mechanismus muss dabei den Belastungen beim Start und extremen Temperaturen im Einsatz widerstehen. Trotzdem muss es möglich sein, ihn auf 200 nm genau zu positionieren um Bilder, aus entfernten Galaxien, in der gewünschten Qualität zu erhalten.

Die Arbeit behandelt die Entwicklung, den Bau und die Funktionstests eines EGSE (Electronical Ground Support Equipment) zur Steuerung dieser sechs-Achsen-Parallelkinematik. Das EGSE muss alle elektrischen und elektronischen Komponenten dieses Mechanismus bedienen. Es wird dazu eingesetzt, alle nötigen Funktionstests vor der Auslieferung an den Kunden durchzuführen.

Die Parallelkinematik wird mit sechs Schrittmotoren angetrieben. Kernelement des EGSE ist die Schrittmotortreiberstufe Nanotec SMCI 36. Diese Treiberstufe bildet den Ausgangspunkt der Entwicklung. Die sechs Treiberstufen werden zusammen mit anderen Komponenten zu einem einsatzfähigen System verbaut. Das Gesamtsystem ist am Schluss in der Lage, die Plattform, durch die Eingabe von fünf Lagekoordinaten, in eine beliebige Endposition zu bewegen. Das EGSE bietet außerdem alle Interfaces, die notwendig sind, um die Motoren im Betrieb messtechnisch zu überwachen.

Eine besondere Herausforderung war es, das EGSE modular aufzubauen. Zu diesem Zweck sind alle sechs Treiberstufen auf eigens dafür designten Platinen verbaut, die die äußere Beschaltung der Steuerung, die Filterung der Ausgangsströme und deren Messung ermöglichen. Zusätzlich zu den sechs SMCI 36 Steuerungen ist eine siebte Steuerung mit der Bezeichnung Starting Current verbaut. Diese Steuerung ermöglicht es, das Losbrechmoment jedes einzelnen Motors zu bestimmen. Die Starting Current wurde mit einem Mikrocontroller realisiert. Um den Mechanismus im Testbetrieb nicht zu gefährden, sind gewisse Sicherheitsvorkehrungen eingebaut. Diese Sicherheitsvorkehrungen sollen in erster Linie eine Fehlbedienung verhindern und sind ebenfalls durch einen Mikrocontroller realisiert worden.

Die Betriebstauglichkeit des EGSE musste, vor dem Einsatz mit der sensiblen Flughardware, nachgewiesen werden. Zu diesem Zweck wurde ein Testhexapod gebaut. Diese Testplattform ist ein grobes Modell des späteren Mechanismus und bildet alle seine Funktionen ab. Als Abschluss der Arbeit wurde das fertige EGSE zusammen mit dieser Testplattform erfolgreich auf Betriebstauglichkeit hin überprüft.

Abstract

Hexapods, alternatively known as Stewart-Gough platforms, allow for the possibility to move in all six degrees of freedom, with a light structure of high rigidity. Therefore they are ideal for a number of applications in which low mass and precision are of high importance. The company RUAG Space Austria is developing such a six-axis-parallel-kinematics, for use in a reflecting telescope in earth orbit. The machinery has to be able to withstand the forces of a rocket launch and the extreme temperatures of space. Despite these conditions it has to be possible to position the mechanism with a precision of 200 nm to take pictures of distant galaxies in the desired accuracy.

This paper examines the development, building and functional checks of an EGSE (Electrical Ground Support Equipment) for the control of said six-axis-parallel-kinematic. The EGSE has to control all of the systems electric and electrical components. It is used to do all necessary functional checks before delivery to the customer.

The parallel-geometry is powered by six stepper motors. At the core of the EGSE is the Nanotec SMCI 36 controller which is the initial point of development. The six controllers are combined with other components to an operational system which will, in the end, be able to move the platform to any desired end position by entering five coordinates. The EGSE also offers all interfaces that are necessary to monitor the stepper motors behaviour while in use.

It was especially challenging to build the EGSE in a modular fashion. To this end all six controllers are mounted on printed circuit boards specifically designed and built for this purpose. These circuit boards enable the external switching of the control system as well as the filtering and measuring of output currents. In addition to the six SMCI 36 controllers a seventh controller is built in with the designation "starting current" which was carried out using a microcontroller. To protect the system in testing conditions, certain safety precautions are built in, which mainly protect the system from user error. These safety precautions were accomplished using a microcontroller.

Serviceability of the EGSE had to be established before using it with the sensible flight hardware that is ment for space applications. For this purpose a test-hexapod was built. This test hexapod is a rough model of the later machinery and displays all its functions. As conclusion for the paper the finished EGSE and the test platform were successfully tested for its serviceability.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Stand der Technik	8
2.1	Hexapod Grundlagen	8
2.1.1	Mathematische Beschreibung des inversen Problems für fünf Freiheitsgrade	10
2.1.2	Eigenschaften von Hexapoden	13
2.1.3	Anwendungsgebiete	13
2.2	Antrieb mittels Schrittmotoren	17
2.3	EGSE	24
2.4	Stand der Technik innerhalb des Unternehmens	25
3	Ziel der Arbeit	32
4	EGSE	35
4.1	Konzeptionierungsphase	35
4.2	Platinendesign für SMCI 36	37
4.3	Starting Current	41
4.3.1	Starting Current im S4 EGSE	43
4.3.2	Entwicklung für das ECHO EGSE	45
4.4	Ausführung	50
4.4.1	Filter mit SMCI 36 und Frontpanel	50
4.4.2	Zusammenbau des Gehäuses und der Mutterverdrahtung	52
4.4.3	Platine für das Mutterprogramm	56
4.4.4	Starting Current	58
5	Test-Hexapod	61
5.1	Fertigung der Achsen	62
5.2	Zusammenbau der Achsen	64
5.3	Gesamter Aufbau	65
6	Funktionstest	68
7	Steuerung über ein Programm	71
8	Resümee	75
9	Zukünftiger Ausblick	76

9.1	Direkte Folgen.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
9.2	Weiterer Ausblick	Fehler! Textmarke nicht definiert.
10	Literaturverzeichnis	78
10.1	Weiterführende Literatur	81
11	Abbildungsverzeichnis.....	82
12	Formelverzeichnis	84
13	Tabellenverzeichnis	85
14	Abkürzungsverzeichnis	86

1 Einleitung

Das Unternehmen RUAG Space Austria entwickelt und produziert verschiedene mechanische und elektronische Komponenten, die in der Raumfahrt Einsatz finden. Diese Komponenten müssen während ihrer Entwicklung und ihres Baus aufwendigen Testprozeduren unterzogen werden, um die Überlebensfähigkeit unter Bedingungen, wie sie im Orbit oder beim Start herrschen, zu gewährleisten. Diese Testprozeduren werden mit Hilfe eines EGSE (Elektronical Ground Support Equipment) durchgeführt. Das jüngste Projekt befasst sich mit dem Bau einer Sechs-Achsen-Parallelkinematik und trägt die interne Projektbezeichnung ECHO. Dieser Mechanismus soll in einem Spiegelteleskop auf einem Satelliten verbaut werden. Das Spiegelteleskop selbst setzt sich aus einem großen sphärischen Holspiegel, der starr auf der Satellitenstruktur befestigt ist, und einem kleineren Spiegel zusammen. Der kleinere Spiegel muss beweglich sein, um ein Einstellen des gesamten Teleskops zu ermöglichen. Dieser kleine Spiegel soll mit der Sechs-Achsen-Parallelkinematik, dem Hexapoden, eingestellt werden. Die Eckdaten für diesen Mechanismus sind:

- $\pm 0,5\text{mm}$ Verfahrweg in der Z-Richtung
- $\pm 0,35\text{mm}$ Verfahrweg in der XY-Ebene.
- 200nm Positioniergenauigkeit.

Für diesen Hexapoden soll ein EGSE entworfen, gebaut und vor dem Einsatz getestet werden. Der Mechanismus wird mit sechs Schrittmotoren betrieben, die alle gleichzeitig und einzeln ansteuerbar sein müssen. Außerdem muss die Steuerung gewährleisten, dass keine unerlaubten Eingaben und Betriebszustände möglich sind, die die Motoren oder den Mechanismus gefährden würden.

Als Abschluss der Arbeit soll mit Hilfe einer eigens dafür zu bauenden Testplattform die Betriebstauglichkeit des EGSE nachgewiesen werden. Es soll möglich sein, den Mechanismus durch Eingabe der fünf Lagekoordinaten in die gewünschte Position zu bewegen. Der Mechanismus soll dabei eine Bewegung ausführen, es dürfen nur Eingaben ausgeführt werden, die die Beweglichkeit des Mechanismus auch zulässt.

Die folgende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung und dem Bau des EGSE sowie des Testhexapoden und der zugehörigen Programmierung.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel soll auf die grundsätzlichen Begriffsdefinitionen eingegangen werden. Es werden die zum Verständnis der Diplomarbeit notwendigen Grundlagen eines Hexapoden erläutert. Im weiteren Verlauf wird auf den Antrieb des Hexapoden mittels Schrittmotoren und deren Steuerung eingegangen. Im zweiten Teil dieses Kapitels wird das Thema EGSE und deren Einsatz im Unternehmen RUAG Space Austria behandelt.

2.1 Grundlagen zu parallelkinematischen Strukturen

Als Hexapoden oder auch Stuart-Gough- Plattformen werden parallelkinematische Mechanismen bezeichnet bei denen sechs Streben oder auch Achsen einen Endeffektor tragen. Diese sechs Streben können in ihrer Länge unabhängig voneinander variiert werden, wie in Abbildung 2 zu sehen ist. Jede Strebe ist an einem Ende gelenkig mit der Referenzebene und am anderen Ende gelenkig mit dem Endeffektor verbunden. Es ergeben sich sechs Gelenkpunkte im Rastraum und sechs Gelenkpunkte im Gangraum. Auf diese Art und Weise kann der Endeffektor in allen sechs Freiheitsgraden des Raumes bewegt werden [1] [2]. Das Ändern der Länge von nur einer Strebe ist möglich und führt zu einer Änderung aller sechs Lagekoordinaten des Endeffektors. In Abbildung 1 ist ein fertig ausgeführter Hexapod zu sehen. Als Rastraum wird in der Kinematik das Inertialsystem bezeichnet. Es stellt den Bezugspunkt dar, gegenüber dem alle Bewegungen stattfinden. Als Gangraum wird das relativ zum Rastraum bewegte System bezeichnet. Durch die Angabe der Position von drei Punkten im Gangraum relativ zum Rastraum werden alle sechs Freiheitsgrade gesperrt.

Das Problem der Position des Endeffektors kann invers vorliegen oder explizit. Als inverses Problem bezeichnet man den Fall, bei dem die Lagekoordinaten für den Endeffektor gegeben sind und daraus die Längen der einzelnen Achsen berechnet werden sollen. Explizit bedeutet, dass die Längen der einzelnen Achsen bekannt sind und daraus die Lagekoordinaten des Endeffektors berechnet werden sollen. Das explizite Problem ist nicht eindeutig lösbar. Es ergeben sich, abhängig von der Kinematik, mehrere mögliche Positionen des Endeffektors. Das Lösen des impliziten Problems ist eindeutig möglich. Für die Zwecke dieser Arbeit wird die Lösung des impliziten Problems dargestellt. Die Randbedingungen für das im Folgenden vorgestellte mathematische Modell sind, dass die Achsen an ihren oberen und unteren Anlenkpunkten Gelenke haben, die zwei rotatorische Freiheitsgrade zulassen und sich beide Achsen, um die die Rotation stattfindet, in einem Punkt, dem Gelenkpunkt, schneiden.

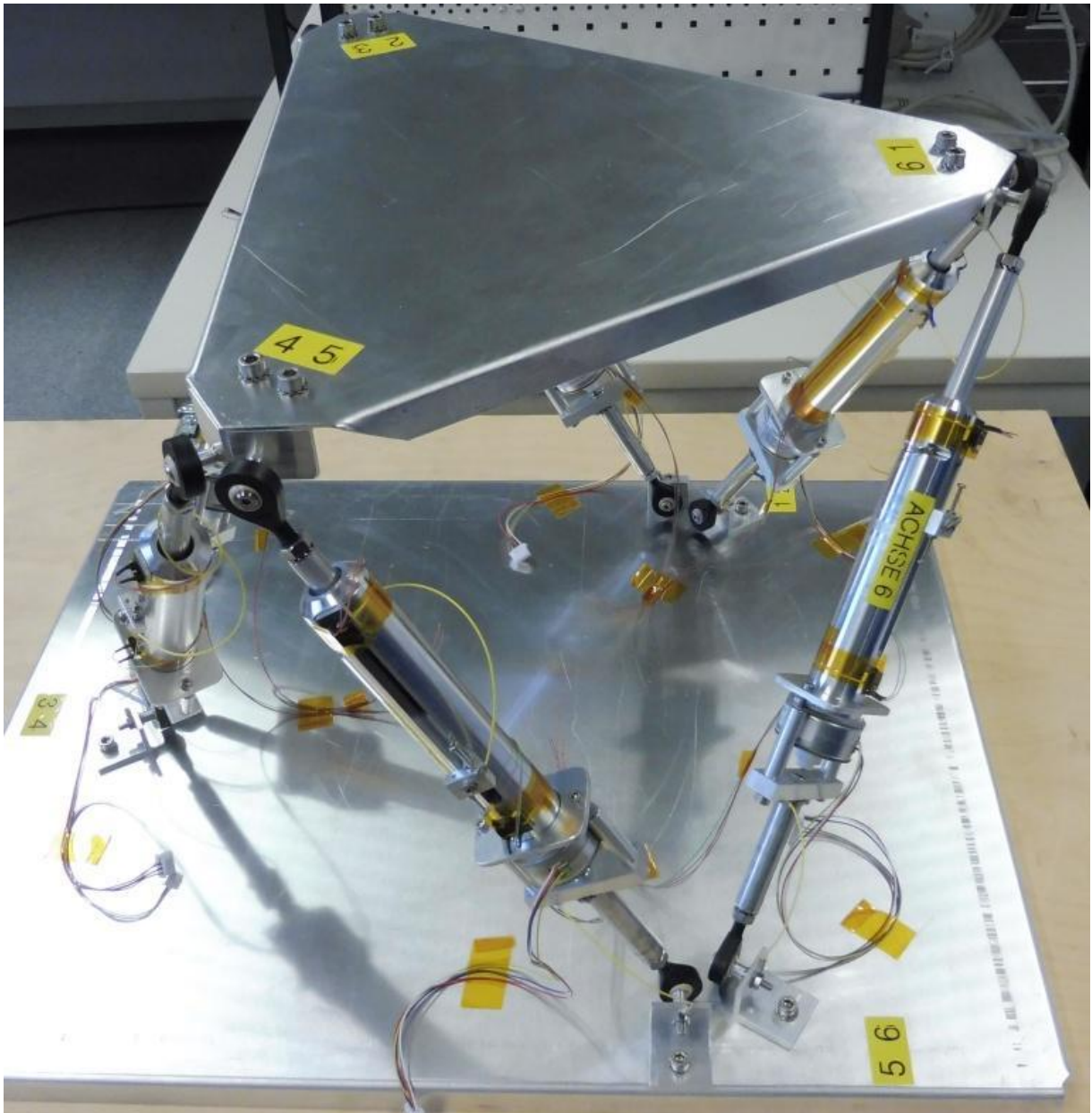


Abbildung 1: ausgeführter Testhexapode

Sind diese Bedingungen erfüllt, unterscheiden sich Hexapoden ausschließlich durch die Lagekoordinaten der Gelenkpunkte im Rastraum und im Gangraum (siehe Abbildung 2) [3]. Es können drei Grundtypen unterschieden werden, die 6-6 oder SSM-Struktur, die 6-3- oder TSSM-Struktur und die 3-3 oder MSSM-Struktur [4] S.72. Bei einer 6-6 Struktur sind die Gelenke im Gang- wie auch im Rastraum als Hexagon ausgeführt. Bei einer 6-3-Struktur ist die Grundplatte ein Hexagon während der Endeffektor als Dreieck ausgeführt ist. Bei der 3-3 Struktur sind die Gelenkpunkte im Gang- wie auch im Rastraum die Form eines gleichseitigen Dreieckes angeordnet. Alle Gelenke sind als Doppelgelenke ausgeführt. Diese Anordnung hat sich als, für die Steifigkeit der Struktur vorteilhaft erwiesen [5]. Die Dreiecke sind dabei zu einander gespiegelt angeordnet und die Flächenschwerpunkte befinden sich übereinander. Es ist aber grundsätzlich möglich, einen Hexapoden zu bauen, bei dem alle Gelenkpunkte

im Ausgangszustand an beliebigen Punkten im Raum liegen [6]. Als Ausgangszustand wird der Zustand bezeichnet, in dem alle Verschiebungen gleich 0 sind. Der ausgeführte Mechanismus, siehe Abbildung 1, wurde an eine 3-3 Struktur angelehnt. In Ermangelung von entsprechenden Doppelgelenken, wurden jeweils zwei Gelenkpunkte so nahe als möglich nebeneinander angeordnet.

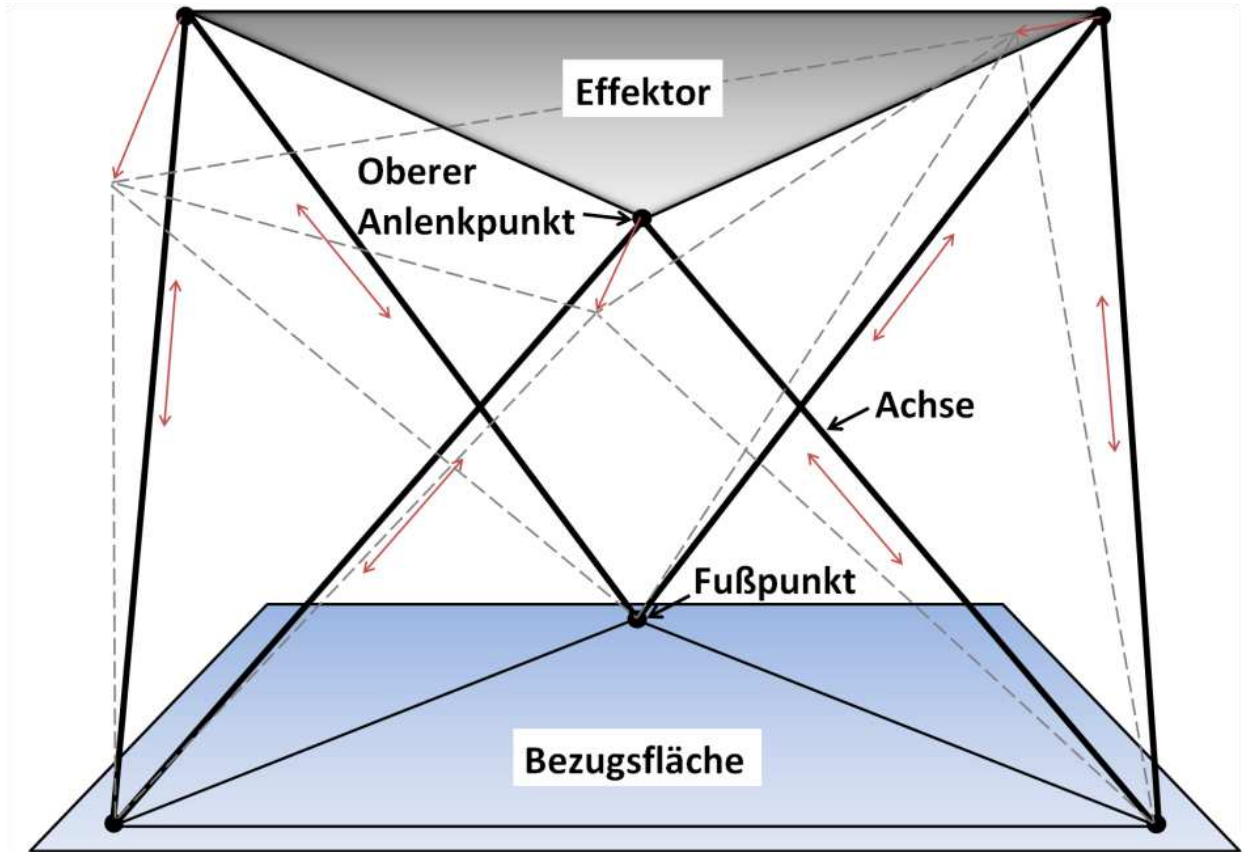


Abbildung 2: Idealisierte Darstellung eines Hexapods in Ausführung als gleichseitiges Dreieck mit möglicher Verschiebung in Pfeilrichtung in grau strichliert

2.1.1 Mathematische Beschreibung des inversen Problems für fünf Freiheitsgrade

Die hier dargestellte Form der mathematischen Beschreibung ist allgemein gültig in [3] zusammengestellt. Zunächst wird die Verschiebung der Gelenkpunkte im Gangraum, im Relativkoordinatensystem $0'$, berechnet. Im Ausgangszustand sind die Positionen der Gelenkpunkte bekannt und durch die Vektoren $r'_n, n \in \{1, \dots, 6\}$ gegeben. Zur Veranschaulichung wird hier der Rechengang anhand des Vektors r'_1 , wie in Abbildung 3 dargestellt, beschrieben.

$$r'_1 = \begin{bmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ z'_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

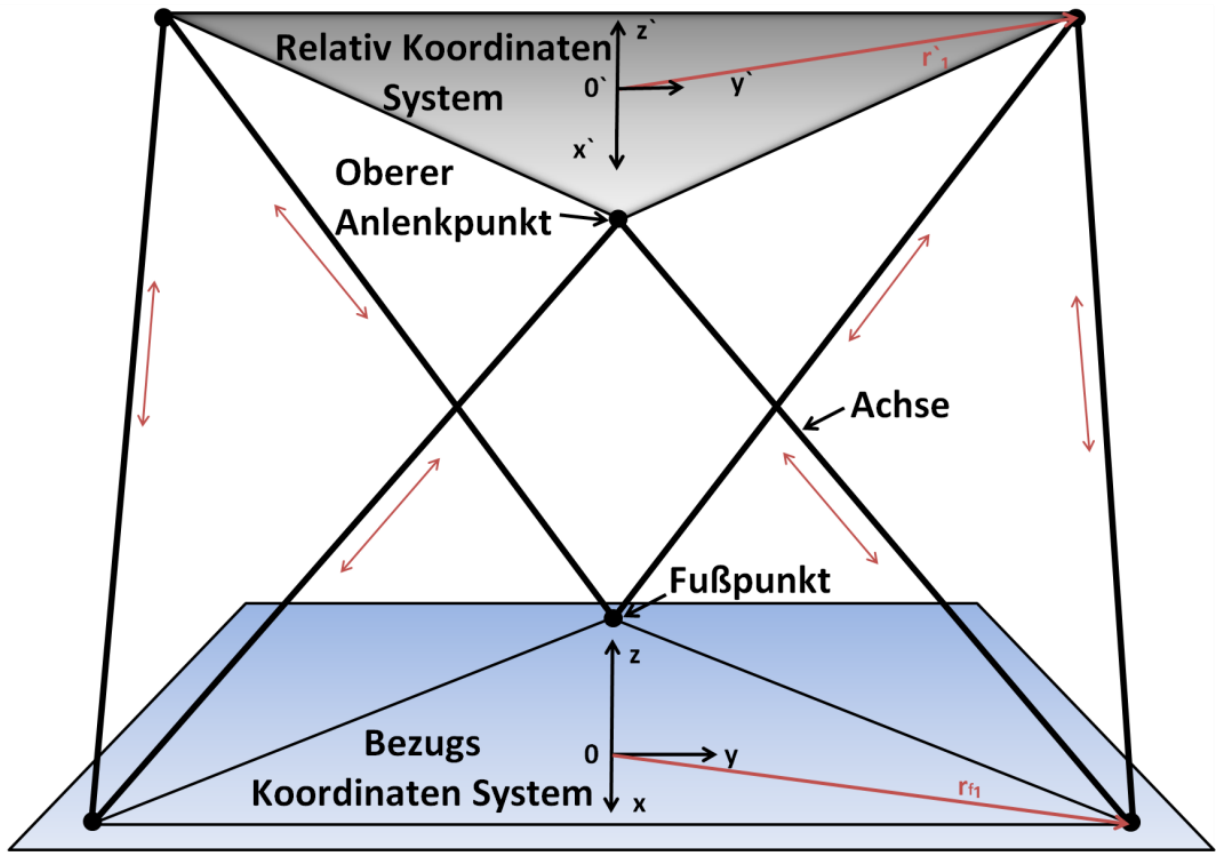


Abbildung 3: Hexapode mit Koordinatensystemen

Der Vektor r'_1 wird den in Abbildung 4 gezeigten Verschiebungen und Verdrehungen unterworfen. Da die Verdrehung um den Winkel Φ_3 für diese Arbeit keine Rolle spielt, wird im Folgenden nicht mehr darauf eingegangen. Mathematisch wird damit davon ausgegangen, dass Φ_3 gleich 0 ist.

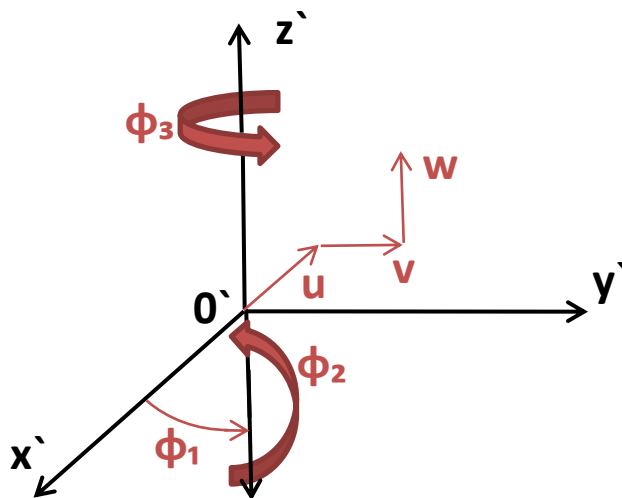


Abbildung 4: Relativkoordinatensystem mit Verdrehungen und Verschiebungen

Der Vektor r'_{11} entspricht dem Vektor von $0'$ zum Gelenkpunkt 1 nach der Verdrehung um Φ_1 und Φ_2 sowie der Verschiebung u , v , w . Im mathematischen Sinne wird das Koordinatensystem um Φ_1 verdreht. In diesem neuen System wird der Vektor um den Winkel Φ_2 gekippt und anschließend wird das System wieder um Φ_1 zurückgedreht. Danach werden die Verschiebungen u , v , w addiert. Abbildung 4 zeigt diese Operationen anschaulich.

$$r'_{11} = (((r'_1 * R_1) * R_2) * R_3) + v \quad (2)$$

$$\text{Verschiebungsvektor} \quad v = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{Rotationsmatrix 1} \quad R_1 = \begin{bmatrix} \cos\Phi_1 & \sin\Phi_1 & 0 \\ -\sin\Phi_1 & \cos\Phi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{Rotationsmatrix 2} \quad R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Phi_2 & \sin\Phi_2 \\ 0 & -\sin\Phi_2 & \cos\Phi_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\text{Rotationsmatrix 3} \quad R_3 = \begin{bmatrix} \cos(-\Phi_1) & \sin(-\Phi_1) & 0 \\ -\sin(-\Phi_1) & \cos(-\Phi_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Der Verschiebungsvektor gibt die neue Position eines Punktes an, der im Ausgangszustand gleich dem Koordinatenursprung von $0'$ war. In Abbildung 3 entspricht der Koordinatenursprung dem Flächenschwerpunkt des gleichseitigen Dreiecks, welches den Endeffektor bildet. Diese Beschreibung wurde für die spätere Berechnung und Programmierung so beibehalten. Mit dieser mathematischen Formulierung des Problems lässt sich das System verhältnismäßig einfach beschreiben.

$$r_{11} = r'_{11} + \begin{bmatrix} x_{0'} \\ y_{0'} \\ z_{0'} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Der Vektor r_{11} entspricht dem Vektor vom Ursprung des Bezugssystems 0 zum Gelenkpunkt 1 nach der Verdrehung und der Verschiebung.

$$a_{11} = r_{11} - r_{f1} \quad (8)$$

a_{11} entspricht dem Vektor vom Gelenkpunkt 1 der Achse 1 im Rastraum zum Gelenkpunkt 1 der Achse 1 im Gangraum nach der Verschiebung. Damit ist der Betrag von a_{11} gleich der neuen Gesamtlänge der Achse 1 l_{a1} , die diese Achse annehmen muss, damit der Endeffektor die durch u , v , w , Φ_1 und Φ_2 definierte Position erreicht.

$$l_{a1} = |a_{11}| \quad (9)$$

Diese Berechnung muss für alle sechs Achsen durchgeführt werden. Dabei hängen die errechneten Längen von den sich im Betrieb ändernden Verschiebungen u , v , w und den Verdrehungen Φ_1 und Φ_2 ab. Außerdem hängen die Längen von den Koordinaten der Gelenke im Gang- und Rastraum ab, die sich im Betrieb nicht ändern. Ist die Geometrie eines Hexapoden im Ausgangszustand bekannt, können mit diesem Satz von Gleichungen zu jeder gewünschten Lage die resultierenden Strebenlängen berechnet werden.

In dieser Beschreibung wurde nur darauf eingegangen, dass die Streben des Hexapoden in ihrer Länge veränderlich sind. Es gibt Hexapode-Konzepte, bei denen die Streben in ihrer Länge unveränderlich sind und sich stattdessen die Positionen der Gelenkpunkte im Rastraum ändern [1]. Auf diese Variante wird im Folgenden nicht weiter eingegangen, da sie für diese Arbeit irrelevant ist.

In der mathematischen Beschreibung wurde von zwei Gelenken pro Achse mit jeweils zwei Freiheitsgraden und einer längenveränderlichen Strebe, d.h. mit einem weiteren Freiheitsgrad, ausgegangen. Damit ergeben sich fünf Freiheitsgrade. Da die Strebe durch einen dreidimensionalen Vektor, der im Raum einer zweidimensionalen Linie entspricht, dargestellt wird, werden dadurch keine Freiheitsgrade des Endeffektors gesperrt. In der Realität müssen aber für jedes der sechs Systeme, bestehend aus zwei Gelenken und einer Strebe, sechs Freiheitsgrade vorhanden sein [7]. Das kann entweder durch eine um ihre Längsachse verdrehbare Achse oder durch ein Gelenk mit drei Freiheitsgraden realisiert werden.

2.1.2 Eigenschaften von Hexapoden

Hexapoden gehören grundsätzlich zu den Parallelkinematiken im Unterschied zu seriellen Kinematiken. Daraus ergibt sich ein sehr gutes Verhältnis von Steifigkeit zu Masse. Die Steifigkeitsverluste, die durch einzelne Führungen und Gelenke auftreten, werden bei einer parallelen Kinematik parallel geschaltet, während sie sich bei einer seriellen Kinematik aufsummieren [8]. Ein Hexapode stellt ein dreidimensionales Fachwerk dar, welches über sehr gute Eigenschaften, im Verhältnis von Steifigkeit zu Masse verfügt. Daraus ergibt sich einerseits eine hohe Positioniergenauigkeit und Wiederholgenauigkeit sowie ein geringeres Gewicht der Gesamtkonstruktion im Vergleich zu dem einer seriellen Kinematik [1] [4]. Für die generelle Anwendung in der Raumfahrt ist das geringe Gewicht ausschlaggebend.

2.1.3 Anwendungsgebiete

Seit etwa Mitte der 60er Jahre sind Hexapoden als Flugsimulatoren (siehe Abbildung 5) in der Pilotenschulung im Einsatz.



Abbildung 5: Flugsimulator [9]

Abbildung 6 zeigt den AMiBA (Array for Microwave Background Anisotropy) Hexapod Telescope Mount am Mauna Loa auf Big Island Hawaii, ein Radioteleskop, welches seit 2009 in Betrieb ist. Es handelt sich 2009 um den größten Hexapod, der in den astronomischen Wissenschaften Anwendung gefunden hat [2].

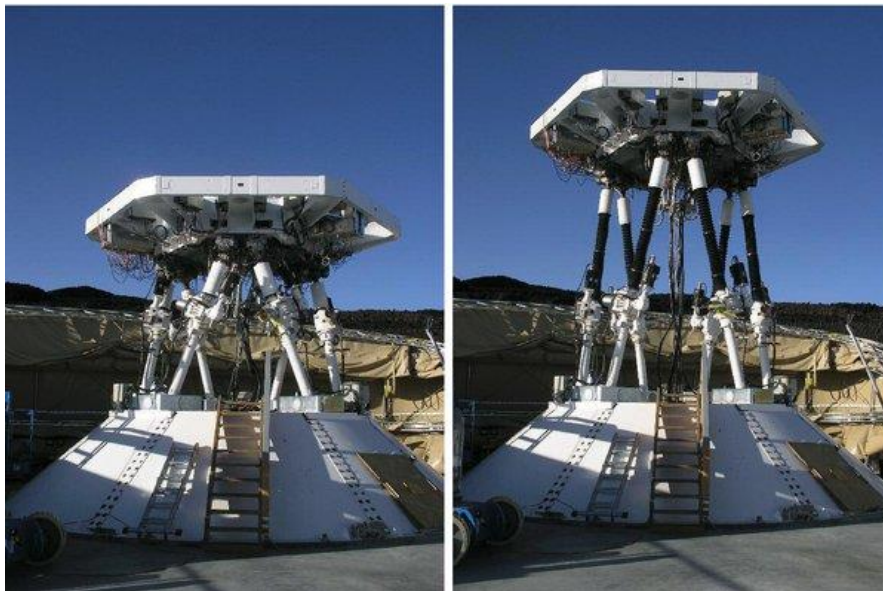


Abbildung 6: AMiBA HEXAPOD TELESCOPE MOUNT [2]

In Abbildung 7 ist ein Hexapode der Firma Physical Instruments dargestellt. Er wird als hochgenaue Positioniereinheit für den Betrieb in Physikalischen Labors eingesetzt.



Abbildung 7: Positioniergerät der FA PI [10]

Parallelkinematiken werden auch als Werkzeugmaschinen eingesetzt, wobei seltener alle sechs Freiheitsgrade genutzt werden. Als Beispiel hierfür soll die tripodische Struktur der Quickstep angeführt werden (siehe Abbildung 8). Es handelt sich dabei um eine parallelkineamtische Struktur bei der sechs längenunveränderliche Arme einen Endeffektor tragen. Jeweils zwei Arme sind im geometrischen Sinne parallel angeordnet und werden von einem Schlitten bewegt. Durch diese spezielle Anordnung wird erreicht, dass der Endeffektor keine Verkippung gegenüber der Bezugsebene erreichen kann. Jedes Strebenpaar weist einen Freiheitsgrad von fünf auf, womit der Freiheitsgrad des Endeffektors drei ist.

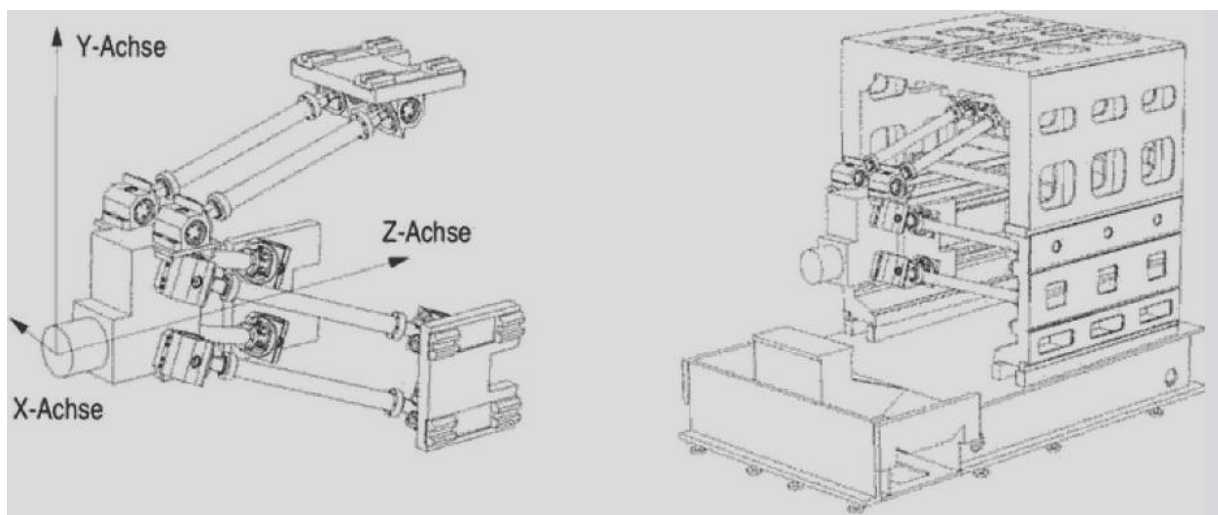


Abbildung 8: Quickstep [4]

Eine andere Anwendung mit ähnlicher Geometrie ist der Flexpicker des Unternehmens ABB. Dabei handelt es sich um einen industriellen Roboter, der für das Manipulieren

von kleinem Stückgut eingesetzt werden kann. Im Unterschied zur Quikstep bewegen sich die drei Armpaare nicht auf einem Schlitten an einer Linearführung, sondern auf schwenkbaren Armen. Durch die Verwendung der Parallellkinematik werden sehr hohe Verfahrgeschwindigkeiten erreicht. Die Manipulationszeit kann dadurch reduziert werden.



Abbildung 9: Flexpicker von ABB [11]

Abbildung 10 zeigt die erste Fräsmaschine mit einer Hexapod-Kinematik, die als Serienprodukt verkauft wurde.



Abbildung 10: Micromat 6X Fräsmaschine [12]

Es gibt außerdem ein neues Projekt der TU Dresden, bei dem ein herkömmlicher Radlader anstelle einer einfachen Hubkinematik mit einem Hexapoden ausgestattet wird. Damit werden Freiheitsgrade erreicht, die sonst nur in speziellen Ausführungen und mit Spezialwerkzeugen möglich sind. Abbildung 11 zeigt den Aufbau der neuen Radladerfront anhand eines 3D-CAD-Modells. Mittlerweile ist der erste Prototyp bereits realisiert und in Erprobung [13].

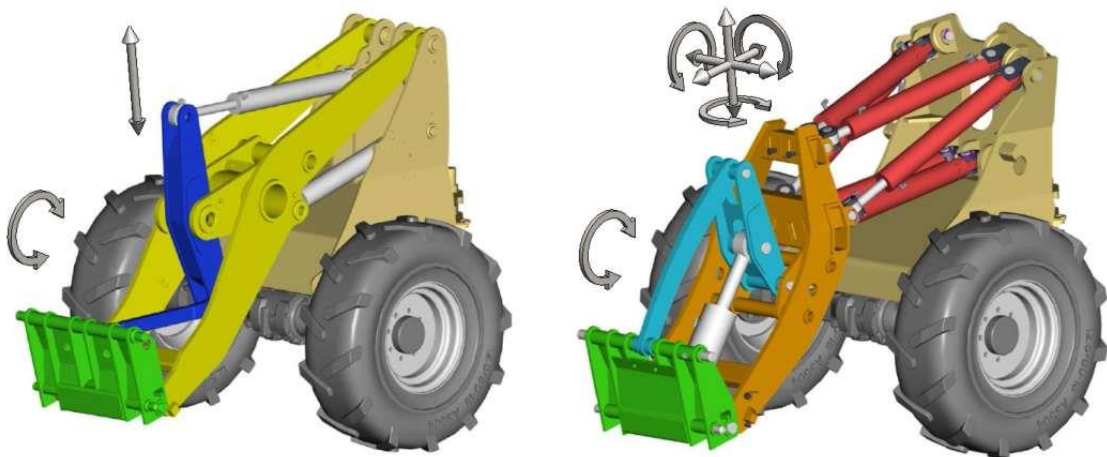


Abbildung 11: Radladerfront mit konventioneller Kinematik links und mit Sechs-Achsen-Parallelkinematik rechts [13]

2.2 Antrieb mittels Schrittmotoren

Als Antrieb für Hexapoden kommen grundsätzlich alle Antriebssysteme in Frage, die eine translatorische Bewegung ermöglichen. Pneumatikzylinder und Hydraulikzylinder

erzeugen direkt eine translatorische Bewegung und können damit direkt als Arm eines Hexapoden eingesetzt werden. Dabei werden Hydrauliken üblicherweise für große Kräfte und große Massen, wie sie beispielsweise bei Baumaschinen (siehe Abbildung 11) oder Flugsimulatoren (Abbildung 5) auftreten, eingesetzt. Pneumatiken hingegen ermöglichen tendenziell höhere Bewegungsgeschwindigkeiten. Elektromotoren benötigen üblicherweise eine Übersetzung der Rotation in eine Translation. Sie kommen dann zum Einsatz, wenn genaues Positionieren des Endeffektors erforderlich ist. Das Teleskop aus Abbildung 6 ist mit Elektromotoren ausgestattet. Die Rotation wird über eine Spindel und eine Gewindemutter in eine Translation umgesetzt. Für elektrische Stellantriebe werden Servomotoren und Schrittmotoren eingesetzt. Servomotoren waren früher Gleichstrommaschinen. Heute sind vermehrt Synchronmaschinen in Verbindung mit einem Drehpositionsmesssystem im Einsatz. Diese Motoren arbeiten mit der Steuerung in einem geschlossenen Regelkreis [14]. Schrittmotoren ermöglichen es, auch ohne Messung in einem offenen Steuerkreis eine genaue Position anzufahren, unter der Voraussetzung, dass der Motor innerhalb seiner Leistungsgrenzen betrieben wird [14].

Schrittmotore haben einen Stator mit ausgeprägten Ständerwicklungen, in welchem ein Magnetfeld umläuft. Der Rotor folgt diesem Magnetfeld sprunghaft. Damit gehören Schrittmotore zur Familie der Synchronmaschinen. Ähnlich wie diese können Schrittmotore auch außer Tritt geraten, wenn diese außerhalb ihrer Leistungsgrenzen betrieben werden. In diesem Fall spricht man von Schrittverlusten. Abbildung 12 zeigt das Prinzip eines zweiphasigen Motors mit zweipoligem Läufer [15].

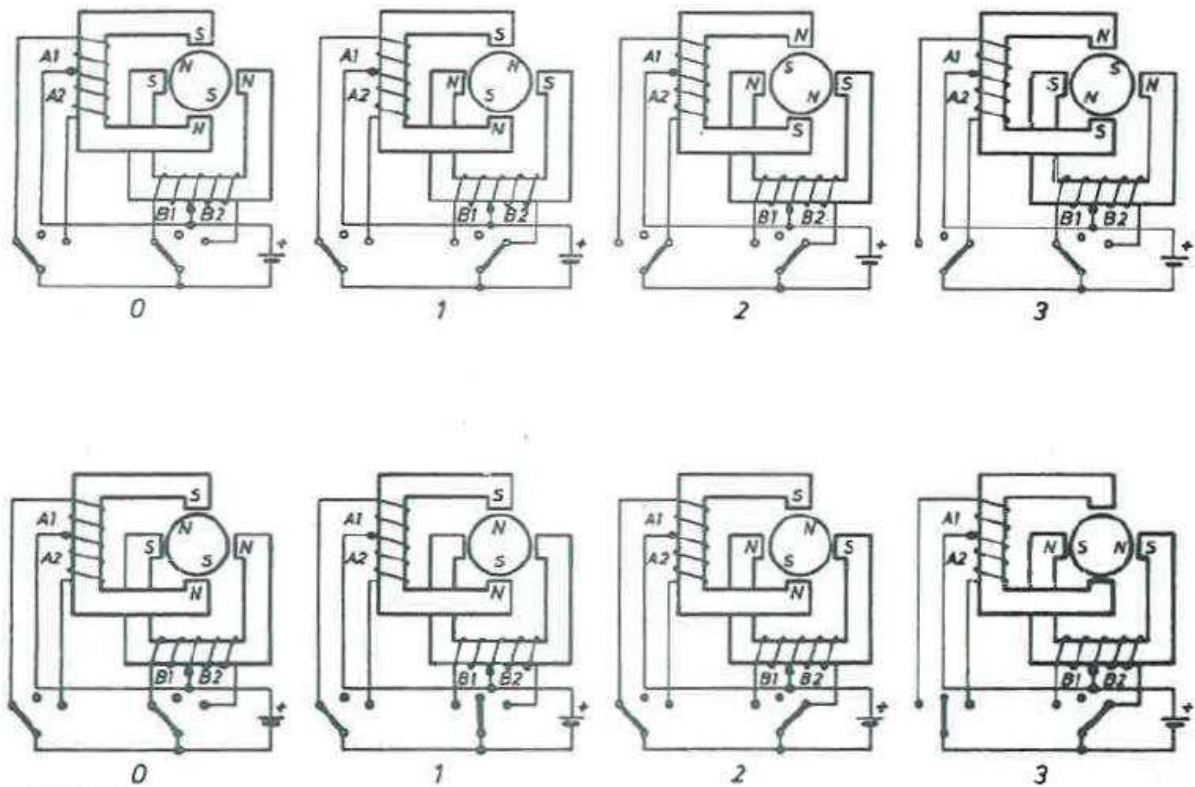


Abbildung 12: Prinzip 2 Phasen Schrittmotor mit Unipolarwicklung, aus [16] S. 78

Die obere Reihe in Abbildung 12 stellt den Vollschrittbetrieb dar. Es werden immer beide Phasen des Stators bestromt. Durch ändern der Polarität einer Phase führt der Motor einen Schritt aus. In der Abbildung ist dies durch die geänderte Schalterstellung dargestellt, was zur Umkehr der Stromrichtung in der Spule B führt. Die untere Reihe stellt den Halbschrittbetrieb dar. Vor der Umpolung der Spule B befindet sich der Schalter in der Neutralposition und die Spule wird überhaupt nicht bestromt.

Das bedeutet, dass der Schrittmotor nur dann eine Drehbewegung ausführt, wenn die Spulen in der richtigen Reihenfolge bestromt werden [15], also die Schalter in Abbildung 12 in der richtigen Reihenfolge betätigt werden. Für reale Anwendungen werden die mechanischen Schalter durch leistungselektronische Bauteile, wie z.B. eine Transistorvollbrückenschaltung, ersetzt. Eine solche Schaltreihenfolge oder Sequenz ist in Abbildung 13 dargestellt [17]. Der Motor führt in dieser Sequenz zehn volle Schritte aus. Abhängig vom Schrittwinkel α dreht sich der Motor dabei weiter. Hier ist die von der Steuerelektronik vorgegebene Motorspannung dargestellt.

$$\alpha = \frac{360}{z} \quad (10)$$

z entspricht der Anzahl an Schritten, die nötig ist, um eine volle Umdrehung zu machen. Für den Motor aus Abbildung 12 gilt $z=4$.

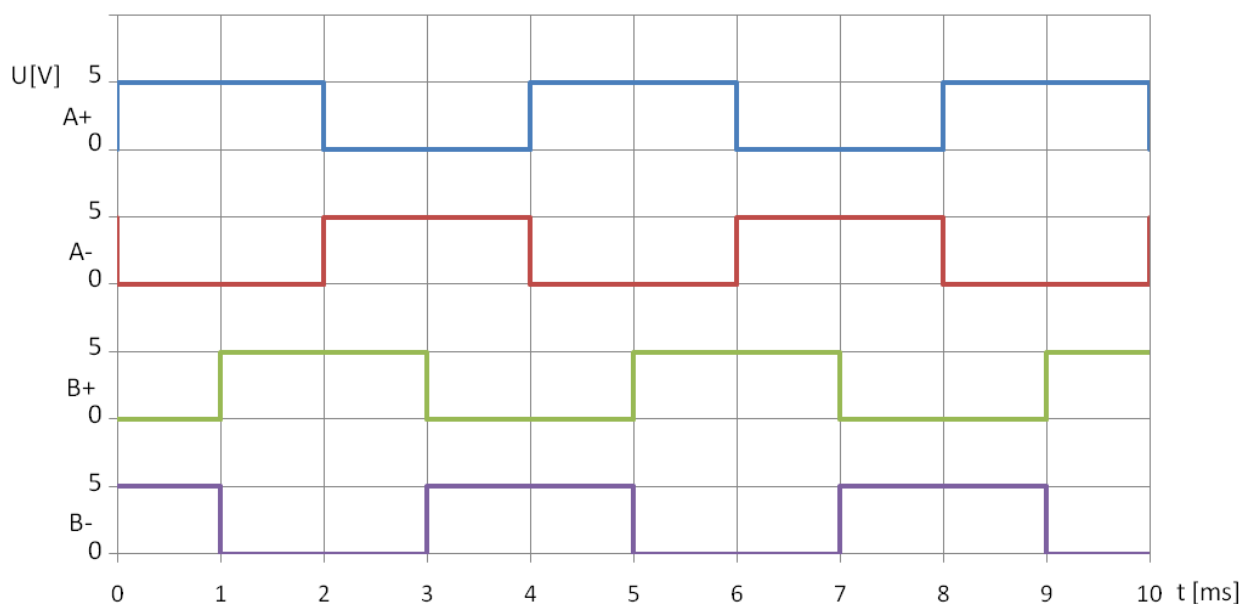


Abbildung 13: Steuersignal für Vollschrittbetrieb [18]

Das Drehmoment kann aus der motorspezifischen Kennlinie abgelesen werden. Grundsätzlich kann aber angenommen werden, dass ein höherer Strom I ein größeres Drehmoment bewirkt. Strom und Spannung hängen über das Ohmsche Gesetz zusammen. Ein Schrittmotor ist keine rein ohmsche Last, sondern immer auch eine induktive Last [19], worauf in Kapitel 4.2 genauer eingegangen wird. Man kann davon ausgehen, dass eine erhöhte Spannung im Motor in erster Näherung einen erhöhten Strom bewirkt und umgekehrt. Damit ist das Drehmoment der Fläche unter den Kurven in Abbildung 13 in grober Näherung proportional.

Je höher die Frequenz ist, umso höher ist auch die induzierte Spannung innerhalb des Motors und umso weniger gilt die einfache zuvor getroffene Annahme [19].

Abbildung 14 zeigt eine andere Sequenz, um die Spulen zu bestromen. Es werden hier auch volle Schritte ausgeführt, die Rastpositionen sind aber um eine halbe Schrittteilung verschoben [15]. Diese Art des Betriebes wird auch als Wave-Betrieb bezeichnet [18]. Es wird immer nur eine Spule bestromt, während im klassischen Vollschrittbetrieb immer beide Spulen mit Spannung beaufschlagt werden. Im Unterschied zum klassischen Betrieb, ist im Wave-Betrieb die Fläche unter den Kurven kleiner, d.h. es ist auch das Drehmoment geringer.

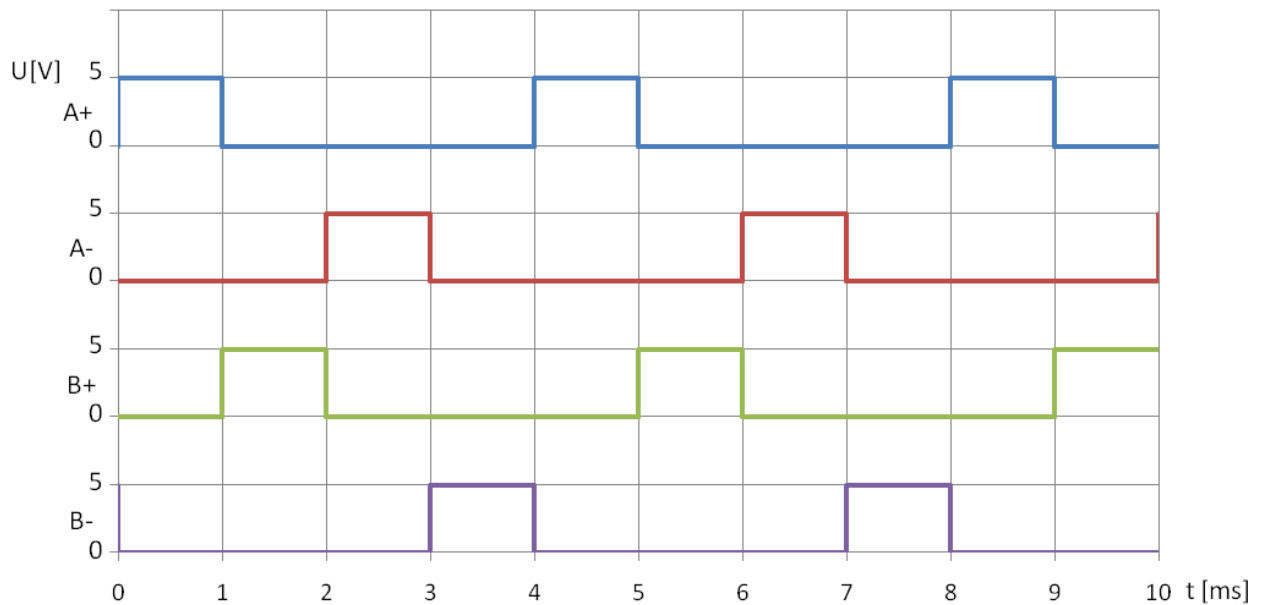


Abbildung 14: Steuersignal für Wave-Betrieb [18]

Wechselt man die Sequenz vom klassischen Vollschritt mit der Wave-Sequenz ab, erhält man die Halbschrittsequenz, die in Abbildung 15 zu sehen ist (siehe auch Abbildung 12 unten). Es werden sogenannte Halbschritte ausgeführt, wodurch die Anzahl der möglichen Rastpositionen verdoppelt wird [15].

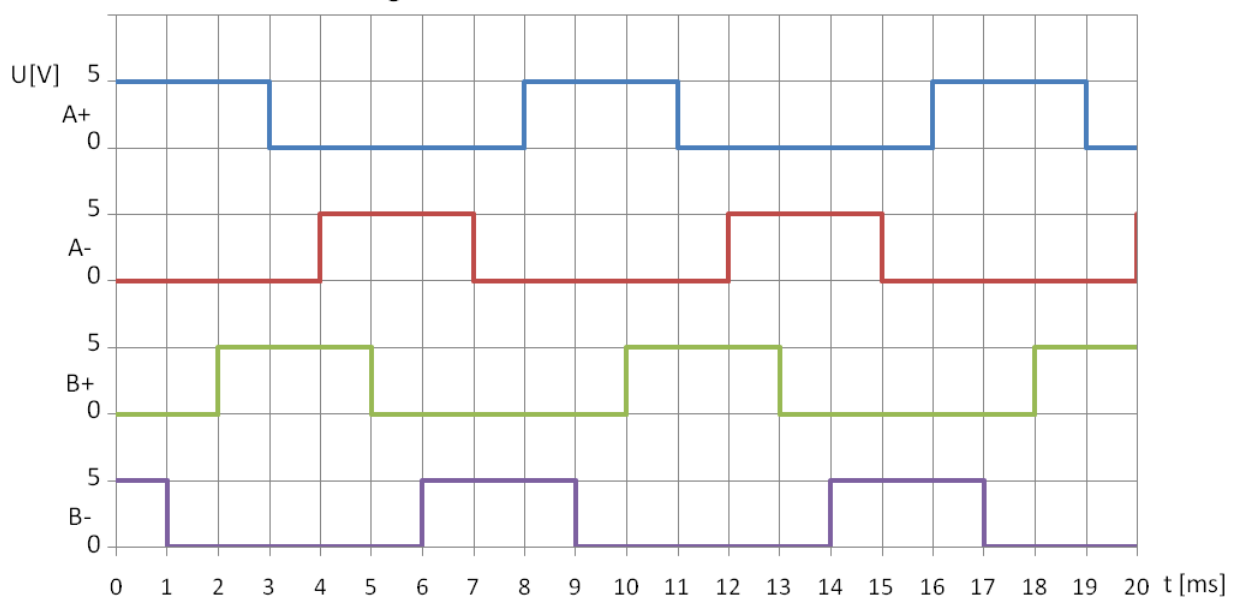


Abbildung 15: Steuersignal für Halbschrittbetrieb [18]

Die Fläche unter den Kurven ist, wie bereits erwähnt, dem Drehmoment proportional. Diese ist aber auch zur eingebrachten Energiemenge proportional. Es ergibt sich also die Möglichkeit, den Energieverbrauch durch Wahl der Bestromungssequenz zu beeinflussen. Der Energieverbrauch ist bei allen Anwendungen in der Raumfahrt ein kritischer Faktor, da die Energiespeichermenge sehr begrenzt ist und nicht mitgeführte Energie nur über Sonnenkollektoren generiert werden kann.

Für Schrittmotore werden zwei Maschinentypen angewandt. Zum einen kommen sogenannte Reluktanzmaschinen zum Einsatz, zum anderen PM-(Permanent Magneterregt) Maschinen. Da die bei RUAG Space gebauten Motore PM-Maschinen sind, soll darauf im Folgenden weiter eingegangen werden.

Für eine PM-Maschine ergeben sich auch im vollkommen unbestromten Zustand Haltepositionen. In jeder Position, die einer Rastposition im Wave-Betrieb entspricht, ergibt sich durch die permanente magnetische Wirkung des Rotors ein Haltemoment ([16] [20] S. 814 ff). D.h., dass es im Wave-Betrieb nicht nötig ist, über die gesamte Schrittdauer zu bestromen. Ab dem Moment, ab dem der Rotor seiner nächsten Rastposition näher ist als seiner vorherigen, wird er sich durch das permanente Magnetfeld auch ohne Bestromung in diese Rastposition bewegen. Dieses Verfahren bezeichnet man als Duty-Cycle-Reduction. In Abbildung 16 ist mit der vollen Linie der normale Wave-Betrieb dargestellt und mit der strichlierten Linie die Reduktion auf 70% Einschaltdauer. Die Duty-Cycle-Reduction bietet die Möglichkeit, den Energieverbrauch weiter zu reduzieren.

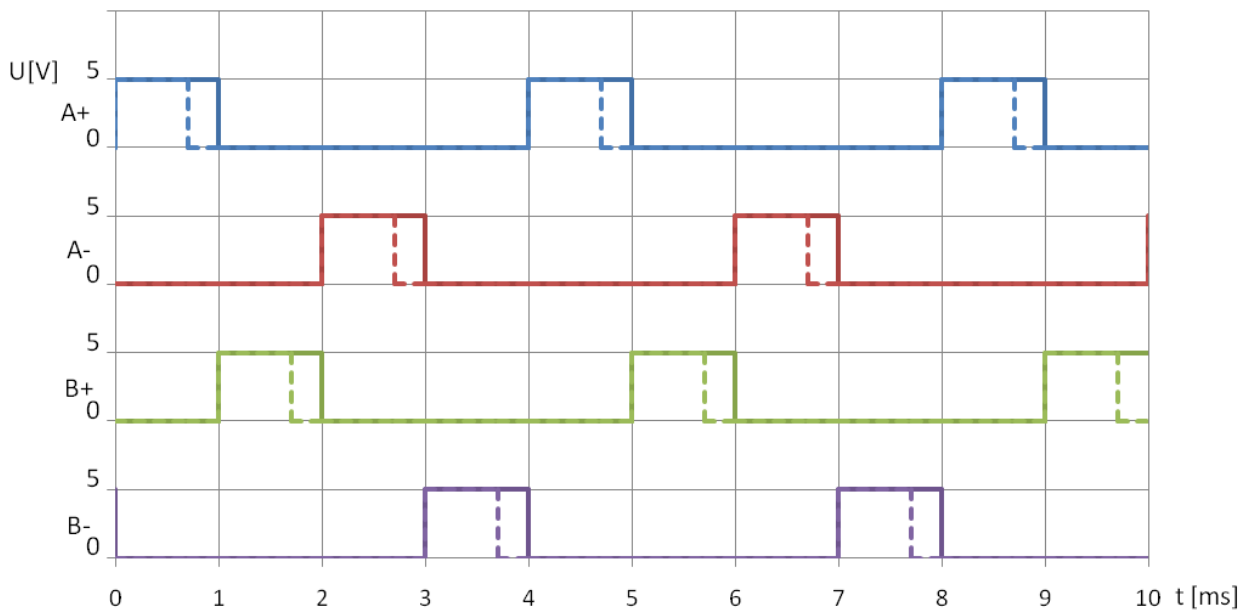


Abbildung 16: Steuersignal für Wave-Betrieb mit möglicher Duty-Cycle-Reduction

Wie weiter oben beschrieben, folgt der Rotor dem Statormagnetfeld sprunghaft. D.h., dass Schrittmotoren in den oben angegebenen Betriebsarten keine gleichmäßige Drehbewegung ausführen, sondern, abhängig von Lastmoment und Frequenz einen Schritt ausführen und anschließend in der Rastposition verweilen, bis der nächste Schritt folgt [21]. Das führt zu einer Schwingungsanregung, die der Schrittfrequenz entspricht.

Durch das Massenträgheitsmoment kommt es an der Rastposition zu einem Ausschwingvorgang. Es können Betriebszustände eintreten, in denen sich der Ausschwingvorgang und die Schrittfolge derart überlagern, dass es zu

Resonanzerscheinungen kommt. Eine Folge davon ist eine erhöhte Amplitude der Schwingungsanregung bis zum Überspringen einzelner Schritte. Diese Zustände sind auf einem Raumfahrzeug unbedingt zu vermeiden [21].

In Abbildung 12 wird ein Motor mit Unipolarwicklung und Mittelpunktanzapfung gezeigt. Das bedeutet, dass in einer Stromrichtung jeweils nur eine Hälfte der Spule Stromdurchflossen ist und nach dem Schaltvorgang die andere Hälfte. Das führt auch dazu, dass immer nur die Hälfte des Materials ausgenutzt wird und diese Motoren schwer sind. Im Vergleich dazu werden Bipolarmotore gebaut, bei denen die gesamte Spule einmal von der einen Seite und einmal von der anderen Seite durchflossen wird. Das führt zu einer wesentlich besseren Ausnützung des Materials und damit zu leichteren Motoren. Die Umkehr der Stromrichtung wird durch einen negativen Strom in den Phasen A und B in Abbildung 17 dargestellt.

Grundsätzlich ist es möglich, den Strom in den Spulen nicht nur ein- oder auszuschalten, sondern auch die Stromstärke bzw. die Spannung zu variieren. Auf diese Art und Weise sind auch kleinere Zwischenschritte möglich. Abbildung 17 zeigt, wie die Bestromung der Spulen im Micro- oder Minischrittbetrieb aussieht. Dadurch wird einerseits die Anzahl an möglichen Rastpositionen erhöht und damit auch die Auflösung der Position ([19] [20] S. 815 ff). Praktische Grenzen für die Erhöhung der Auflösung sind durch Fertigungstoleranzen und Rastmomente gegeben. *„Üblich und sinnvoll ist die Erhöhung der Auflösung um den Faktor 10...20.“* [19] S. 152. Andererseits wird dadurch die Frequenz der Schwingungsanregung stark erhöht, jedoch die Amplitude gesenkt. Durch eine hochaufgelöste Sinusform der Kurve ergibt sich ein Betriebsverhalten, bei dem die Schwingungsanregung nahezu vollständig vermieden werden kann [15] [19] (Siehe dazu Abbildung 17 rechts außen).

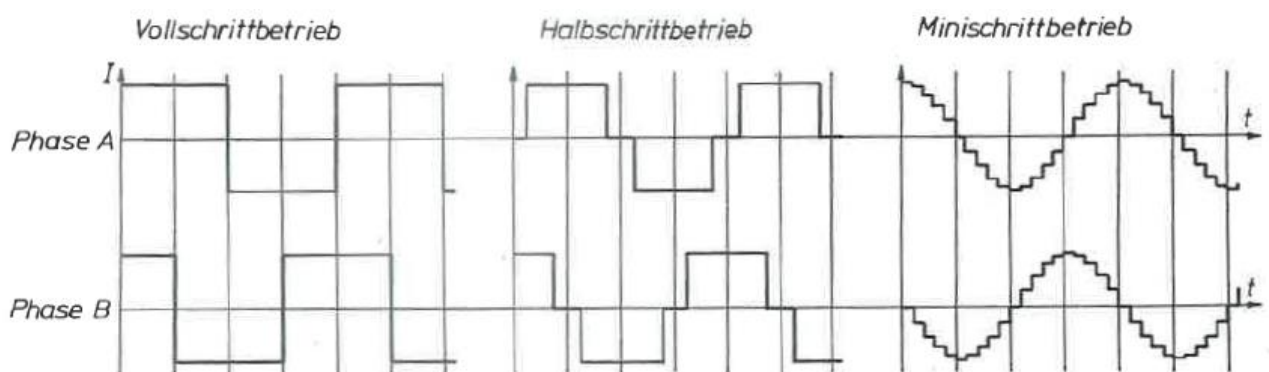


Abbildung 17: Unterschiedliche Signale für den Motorstrom [16] S. 80

Die in den Abbildungen auf Seite 20, 21 und 22 angeführten Beispiele gehen von einem Konstantspannungsbetrieb des Motors aus. Der Motor ist sowohl eine ohmsche als auch eine induktive Last. Entsprechend den Gesetzen für diese Lasten stellt sich damit der Motorstrom ein. Bei niedrigen Frequenzen folgt der Strom annähernd der Spannung. Bei höheren Frequenzen erreicht die im Motor induzierte Spannung die

Größenordnung der Versorgungsspannung. Damit erreicht der Strom während einer Periode seinen Sollwert nicht [19]. Die Annahme von Seite 20 ist damit nur noch eingeschränkt gültig. Um dem entgegenzuwirken, arbeiten moderne Schrittmotorsteuerungen (z.B. der Firma Nanotec oder Phytron) im stromgeführten Betrieb. D.h., dass der Strom mittels choppen (sehr schnelles Ein- und Ausschalten einer höheren Spannung als im Konstantspannungsbetrieb) über die Amplitude annähernd konstant gehalten wird.

Der Vorgang des Umpolens einer Spule verursacht durch das bestehende Magnetfeld eine Spannungsspitze. Diese Spannungsspitze wird durch die Steuerelektronik abgeleitet, d.h., dass die Steuerelektronik und das Versorgungsnetz diese Spannungsspitze auffangen können müssen. Zu diesem Zweck wird ein Pufferkondensator verbaut (Siehe dazu auch Kapitel 4.2).

RUAG Space verwendet Bipolarmotore mit einer redundanten Wicklung. D.h., dass im Motorgehäuse eine vollständige zweite Statorwicklung für die Phasen A und B verbaut ist. Dies ist eine Vorgabe in der Raumfahrt und erhöht die Ausfallssicherheit.

2.3 EGSE

EGSE steht für Electrical Ground Support Equipment. Es umfasst alle elektrischen und elektronischen Einrichtungen, die zur Unterstützung, zum Testen und zum Betrieb von Flughardware am Boden vor dem Start eingesetzt werden [Begriffsdefinition ESA]. Der Begriff ist grundsätzlich sehr weitläufig gefasst. Bei RUAG Space Austria werden EGSEs für sehr unterschiedliche Aufgaben hergestellt, abhängig von der jeweiligen Flughardware, für die sie konzipiert sind. In der Abteilung AIV (Assembly Integration and Variation) werden EGSEs zur Bedienung von Mechanismen eingesetzt. RUAG Space bietet ein breites Sortiment an Flugmechanismen an. Der Hexapode gehört grundsätzlich zu den aktuatorbetriebenen Mechanismen. Für alle derartigen Produkte wird auch die Steuerelektronik zur Verfügung gestellt. Beide Komponenten müssen vor der Auslieferung separat auf ihre Funktion hin überprüft werden. Von der ersten Idee eines neuen Mechanismus bis zu dessen Auslieferung werden mindestens vier Modelle gefertigt.

- Mockup-Modell 1
- Mockup-Modell 2
- Qualifikation-Modell (QM)
- Flight-Modell (FM)

Beim Mockup-Modell 1 handelt es sich um ein nicht funktionsfähiges Modell in Originalgröße des Mechanismus. Dieses Modell dient der Veranschaulichung, der Größenbestimmung, ersten Assembly-Tests und als Anhaltspunkt für die Konstrukteure. Ein Großteil der Teile wird im 3D-Druck hergestellt.

Das zweite Mockup-Modell ist bereits teilweise funktionsfähig. Viele elektronische Komponenten sind noch als Dummies ausgeführt. An diesem Modell werden bereits Assembly-Prozeduren getestet und festgelegt. Um die Qualität zu gewährleisten, werden die späteren Mechanismen nach genauesten Prozeduren zusammengebaut, welche von mehreren Abteilungen abgesegnet werden müssen. Diese werden als „Assembly-Procedure“ bezeichnet. Während der Prozedur wird der momentane Stand ständig protokolliert und fotografiert. Dieses Protokoll gehört verpflichtend zu den Dokumenten für die Flughardware und muss den vom Kunden gewünschten Spezifikationen entsprechen.

Das QM ist eine voll funktionsfähige Version des Mechanismus, die bereits dem späteren FM entspricht. Das QM wird bereits nach der Assembly-Procedure montiert. Das QM wird auf alle Forderungen der Spezifikation geprüft, in vielen Fällen bis zur Zerstörung. Ein Fehler oder Versagen in diesem Stadium ist kritisch für das gesamte Projekt und kann zum Abbruch führen.

Das FM ist der Mechanismus, der später auch tatsächlich für den Flug zum Einsatz kommt. Die Tests hierfür laufen ebenfalls unter genauesten Bestimmungen, ab um die Qualität zu sichern. Der Mechanismus wird dabei aber nicht an seine Belastungsgrenzen gebracht.

Das EGSE wird für alle Testprozeduren des QM und FM benötigt. Für jede am Mechanismus verbaute elektrische oder elektronische Hardware muss das EGSE ein entsprechendes Interface bieten. In einfachen Fällen kann es sich dabei nur um einen Endschalter oder einen Temperaturfühler handeln. Bei komplexeren Mechanismen ist häufig ein Wegmesssystem verbaut bzw. werden viele Mechanismen mit Elektromotoren angetrieben.

2.4 Stand der Technik innerhalb des Unternehmens

Seit 2015 werden die EGSEs, die in der AIV von RUAG SPACE benötigt werden, direkt dort entwickelt und gebaut. Aus der damaligen Entwicklung sind bis zu dieser Arbeit drei EGSEs hervorgegangen, die die Nanotec Steuerung, SMCI 36, als Schlüsselkomponente haben.

Das letzte gebaute EGSE stellt gewissermaßen den Stand der Entwicklung innerhalb des Unternehmens dar und gleichzeitig den Startpunkt für diese Arbeit. Daher soll im Folgenden der Aufbau dieser Steuerung beschrieben werden.

Das EGSE ist für einen Mechanismus mit der Bezeichnung S4 entwickelt worden. Es handelt sich dabei um eine Objektivabdeckung für ein optisches Instrument. Zwei Abdeckklappen werden geöffnet und geschlossen. Dabei darf immer nur eine Klappe offen sein, während die andere geschlossen sein muss. Beide Klappen werden mit

Schrittmotoren der Firma RUAG Space Austria [22] betrieben. Abbildung 18 zeigt das Schema der Energieversorgung für das S4 EGSE. In Tabelle 1 sind die einzelnen Baugruppen aufgelistet.

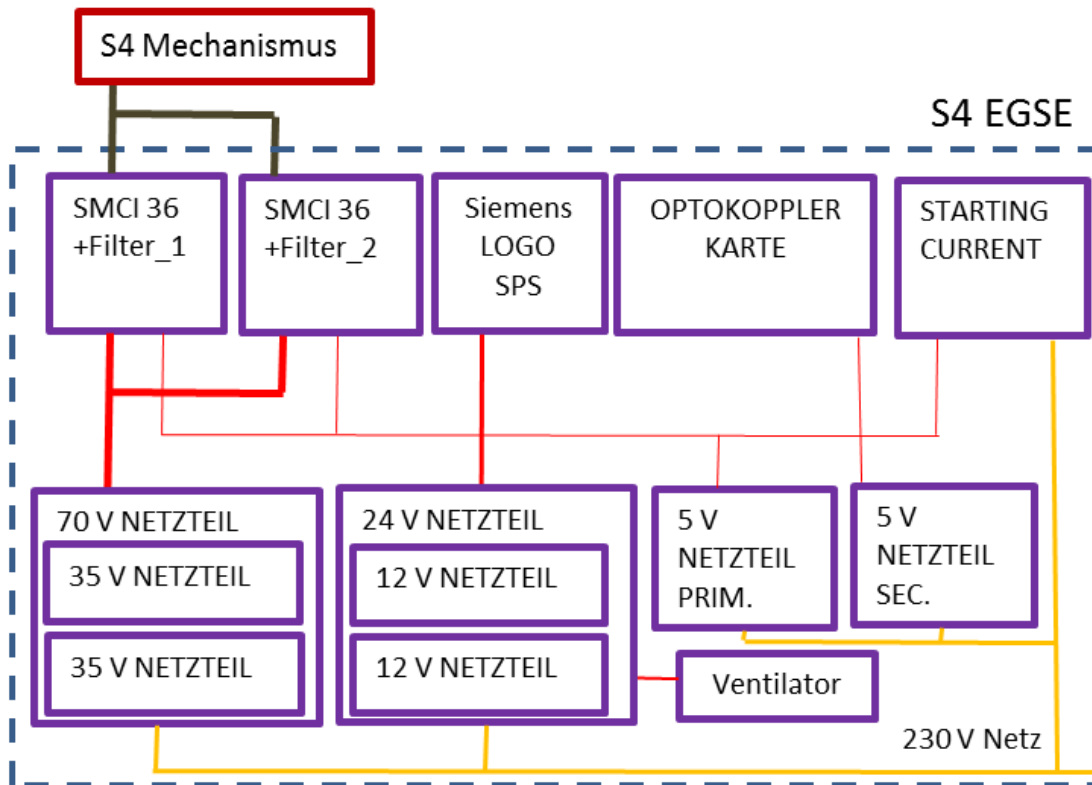


Abbildung 18: Schema der Energieversorgung des S4 EGSE

In Abbildung 19 sind die Vernetzungen zwischen den einzelnen Hauptbaugruppen dargestellt. Das Schema zeigt auch die Einbindung des Messgerätes und des Steuerungs-PC in die Informationsflüsse.

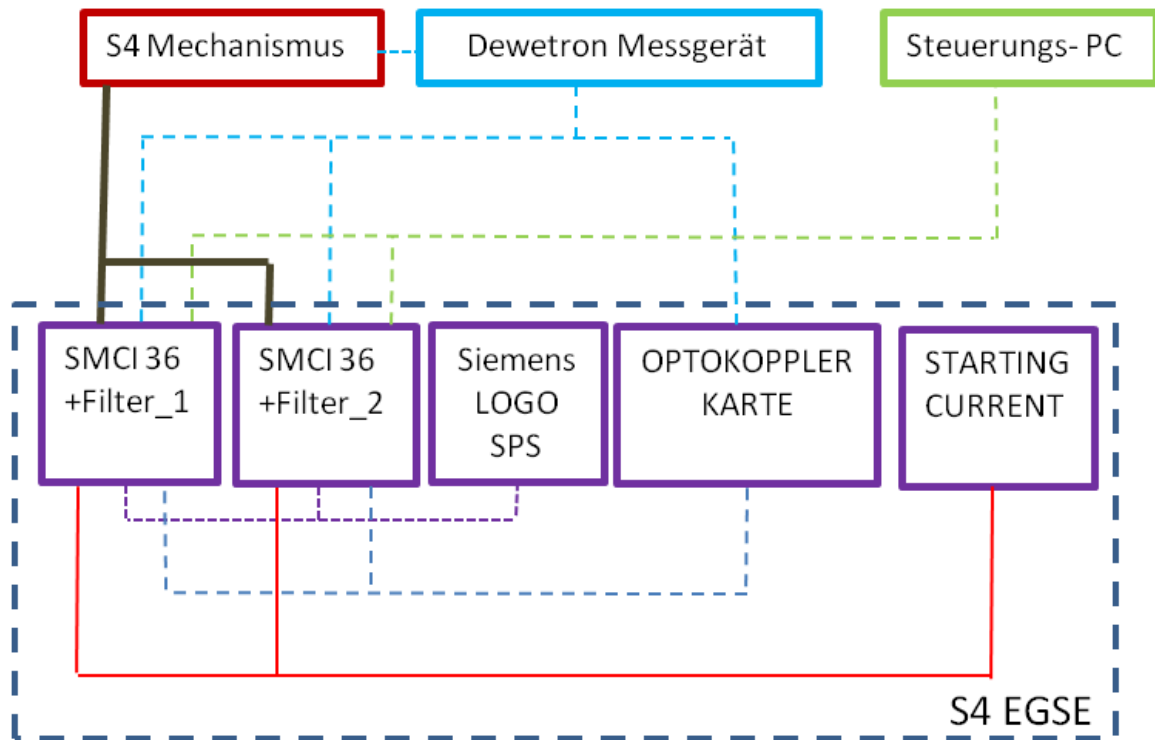


Abbildung 19: Schema der Vernetzung zwischen den Hauptbaugruppen

Die SMCI 36 Schrittmotorsteuerung von Nanotec wird mit 70 V Gleichspannung versorgt. Dies kann preisgünstig am Einfachsten durch eine Serienschaltung von zwei 35 V Netzteilen realisiert werden. Des Weiteren benötigt die SPS von Siemens 24 V Gleichspannung. Da für den Kühlungs-Ventilator 12 V Gleichspannung benötigt werden, sind in diesem Fall zwei 12 V Netzteile in Serie geschaltet. Als Logikspannungsniveau wurden 5 V (5 V Netzteil Prim.) gewählt, da damit die meisten handelsüblichen Schalter, Potentiometer und ICs problemlos betrieben werden können. Um die Optokopplerkarte zu versorgen, wird ein eigenes Netzteil verwendet (5 V Netzteil Sec.). Dieses garantiert ein wesentlich geringeres Grundrauschen für die Optokoppler.

Die SMCI 36 von Nanotec wurde gewählt, da es sich dabei um eine der wenigen am Markt erhältlichen, industriellen Schrittmotorsteuerungen handelt, die 70 V Ausgangsspannung liefern können. Bei allen Schrittmotorendstufen ist es wichtig, dass diese im Betrieb nicht vom Motor getrennt werden bzw. dass immer eine Last anliegt, wenn die Schrittsequenz ausgegeben wird, da sie sonst beschädigt werden könnten [23]. Die SMCI 36 ist eine stromgeführte Steuerung mit einer Choppfrequenz von 50 kHz.

Komponenten im S4 EGSE	Beschreibung und Funktion
SMCI 36	Konstantstromgeführte Schrittmotorsteuerung von Nanotec
Filter	Elektrischer passiver Filter zur Reduktion des Grundrauschens im System
Starting Current	Spannungsgeführte Schrittmotorsteuerung zur Messung des Losbrechstromes
Optokoppler-Karte	Platine mit mehreren Optokopplern zur Potentialtrennung und zum Spannungspegelausgleich
70 V Netzteil	Spannungsversorgung für SMCI 36
24 V Netzteil	Spannungsversorgung für SPS (Speicher Programmierbare Steuerung) + Kühlluft Ventilator
5 V Netzteil Prim	Logikspannungsversorgung
5 V Netzteil Sec	Logikspannungsversorgung für Optokoppler. Der Stromkreis für den Optokoppler ist galvanisch von allen anderen Stromkreisen getrennt, um das Grundrauschen in diesem Subsystem weitestgehend zu vermeiden.
Siemens LOGO	SPS dient der Absicherung der einzelnen Komponenten und steuert alle Relais
Ventilator	Dient der Abfuhr von Abwärme
Steuerungs-PC	Über diesen PC wird der Ablauf der Testprozedur gesteuert
Dewetron Messgerät	Das Messgerät nimmt alle relevanten elektrischen Größen auf. Außerdem wird damit die Temperaturüberwachung durchgeführt.

Tabelle 1: Komponenten des S4 EGSE

Die Optokopplerkarte ist notwendig, um digitale Signale mit einem 5 V Pegel ein- und auslesen zu können. Durch die Choppfrequenz der Nanotec-Steuerungen ist das Grundrauschen im System so hoch, dass der 5 V Pegel nur durch einen Optokoppler eindeutig bestimmt werden kann. Des Weiteren dient diese dazu, den Spannungspegel der Siemens SPS LOGO von 24V auf den Spannungspegel der Nanotec von 5V anzupassen.

Ein Optokoppler besteht aus einer LED und einem Phototransistor. Wird die LED mit Spannung versorgt, emittiert diese Licht. Dadurch wird der Phototransistor in den leitenden Zustand versetzt. Damit ist eine vollständige galvanische Entkopplung zwischen dem Stromkreis mit der LED und dem Stromkreis mit dem Transistor gegeben. Die Informationsübertragung findet nur durch das emittierte Licht statt. Diese galvanische Entkopplung bezeichnet man auch als Potentialtrennung ([24] S. 177 [25]). Der Spannungspegel der Diode muss durch Vorwiderstände angepasst werden. Die Ausgangsspannung des Transistors hängt grundsätzlich von der Bauart ab und ist dem Datenblatt zu entnehmen. Die Schaltung kann nur die diskreten Zustände Ein und Aus annehmen. Es gibt Sonderbauformen, die eine analoge Übertragung ermöglichen. Darauf soll hier aber nicht eingegangen werden. Damit kann ein Signal, welches theoretisch die diskreten Zustände 5 V und 0 V haben sollte und in der Realität aber einem starken Rauschen unterworfen ist, wieder auf diese diskreten Zustände reduziert werden.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil ist die Starting-Current. Diese ist notwendig, um den Losbrechstrom und die Losbrechspannung messen zu können (siehe Kapitel 4.4.4). Für die SMCI 36 ist es nur möglich, den Strom in Prozent des maximal möglichen Stroms einzustellen. Das bedeutet, dass der Strom nur in diskreten Schritten erhöht werden kann. Um den Losbrechstrom eindeutig bestimmen zu können, muss dieser aber analog kontinuierlich erhöht werden, bis sich der Motor das erste Mal bewegt. Auf den Aufbau der Starting-Current wird in Kapitel 4.3 näher eingegangen.

Die Siemens SPS LOGO fungiert als Sicherheitsschaltung. Einerseits wird sichergestellt, dass die Starting-Current einen Motor nur dann bestromen kann, wenn dieser nicht durch eine SMCI 36 bestromt wird. Andererseits wird verhindert, dass ein Motor losfahren kann, während sich der Andere nicht in der Position „Deckel geschlossen“ befindet.

Im elektrischen Kreis ist nach der SMCI 36-Steuerung ein elektrischer Filter geschaltet. Dieser Filter reduziert das Rauschen im System, welches durch die 50 kHz Choppfrequenz verursacht wird (siehe auch Kapitel 4.4.1). Auf der Platine für diesen Filter sind alle Komponenten, die der Versorgung der SMCI 36 dienen, sowie die Verkabelung für die äußere Beschaltung der Steuerung, untergebracht.

Der Filter besteht aus einer Kombination von Drosseln bzw. Induktivitäten, Kondensatoren bzw. Kapazitäten und Widerständen [26]. Die von der Frequenz abhängigen Eigenschaften von Induktivität und Kapazität werden so kombiniert, dass gewisse Frequenzen im Signal unterdrückt werden [27]. Da es sich ausschließlich um passive elektrische Bauteile handelt, wird er auch als passiver Filter bezeichnet. Der Filter wurde für den Bau des ECHO EGSE unverändert übernommen.

Die eigentliche Messaufgabe wird von einem Messgerät des Unternehmens Dewetron erfüllt. Die analogen Größen sind in Tabelle 2 aufgelistet. Es müssen auch binäre Signale zwischen Messgerät und EGSE ausgetauscht werden. Diese Signale sind in Tabelle 3 aufgelistet. Die Angabe I/O (Input/Output) ist für das EGSE dargestellt.

Analoges Signal	I/O	Beschreibung
Phasenspannung	O	Pro Motor sind Phase A und B zu messen. Von beiden Phasen müssen Strom und Spannung gemessen werden.
Phasenstrom	O	
Steuerspannung	I	Eine Steuerspannung für das steuerbare Netzteil der Starting-Current kann vom Messgerät vorgegeben werden.

Tabelle 2: Analoge Signal zwischen S4 EGSE und Messgerät

Binäres Signal	I/O	Beschreibung
Endschalter open/closed	O	Pro Motor zeigt je ein Endschalter die Position Klappe „offen“ oder „geschlossen“ an
Clock	O	Das Clock-Signal ist die Taktvorgabe der Starting-Current und wird vom Messgerät als Triggersignal aufgenommen.
Temperatur-Not-Aus	I	Wird vom Messgerät an die SMCI 36 ausgegeben und schaltet die Steuerung bei einer detektierten Übertemperatur ab
Watchtalk	I	Wird vom Messgerät an die SMCI 36 ausgegeben und garantiert dass das Messgerät Online ist

Tabelle 3: Binäre Signale zwischen S4 EGSE und Messgerät

Die Motortemperatur ist ein kritischer Parameter. Die Tests werden bei sehr tiefen Temperaturen im Vakuum ausgeführt. Durch das Vakuum kann Wärmeabfuhr ausschließlich durch Strahlung erfolgen und wird damit, im Vergleich zu Standardbedingungen, erheblich verschlechtert. Die Messung erfolgt mit Thermoelementen PT100. Sobald das Messgerät eine Übertemperatur festgestellt, wird der Test durch das Temperatur-Not-Aus-Signal unterbrochen.

Da diese Temperaturüberwachung kritisch ist, muss sichergestellt sein, dass der Test unterbrochen wird, sobald das Messgerät offline ist. Dies geschieht durch das Signal Watchtalk. Es handelt sich dabei um ein Signal mit 5 V Pegel, welches alle 0,25 Sek. für 0,05 Sek. HIGH gesetzt wird. Wird dieses Signal nicht mehr innerhalb des EGSE detektiert, wird der Test unterbrochen.

Die Messgeräte des Unternehmens DEWETRON werden mit der Software DeweSoft betrieben. Damit können komplizierte Messaufgaben realisiert werden. Der gesamte Messablauf für die Starting-Current kann dadurch automatisiert ablaufen. Des Weiteren ist die Software ein mächtiges Tool für die Online- sowie für die Offline-Auswertung.

3 Ziel der Arbeit

Ziel ist es, ein EGSE für einen speziellen Hexapoden mit der firmeninternen Projektbezeichnung ECHO zu erstellen. Ein Konzept für den Mechanismus ist in Abbildung 20 zu sehen. Alle elektronischen Komponenten sollen in einem 19 Zoll Gehäuse verbaut werden. Im fertig verbauten Zustand muss Anwendersicherheit laut DIN VDE 0106 Teil 100 gegeben sein. Um die Betriebsfähigkeit der Steuerung nachzuweisen, soll ein Testhexapode gebaut werden. Es soll möglich sein, über ein eigens dafür zu schreibendes Programm den Mechanismus mittels Endschalter zu referenzieren und die fünf Lagekoordinaten X , Y , Z , Φ_1 und Φ_2 direkt anzufahren. Dabei soll der Mechanismus eine simultane Bewegung ausführen. D.h. alle sechs Achsen müssen zeitgleich mit der Bewegung beginnen und diese zeitgleich beenden. Es ist allerdings nicht notwendig eine lineare Bewegung auszuführen, d.h. die Bewegungsgleichung muss nicht gelöst werden. Im ECHO-Mechanismus werden zweiphasige Schrittmotore mit 70V Betriebsspannung und maximal 0,25 A pro Phase eingesetzt. Die meisten am Markt erhältlichen Steuerungen sind nicht für derartige Motore geeignet. In vorangegangenen Projekten wurden bereits gute Erfahrungen mit Steuerungen vom Typ Nanotec SMCI 36 gemacht. Daher sollen diese zum Einsatz kommen.

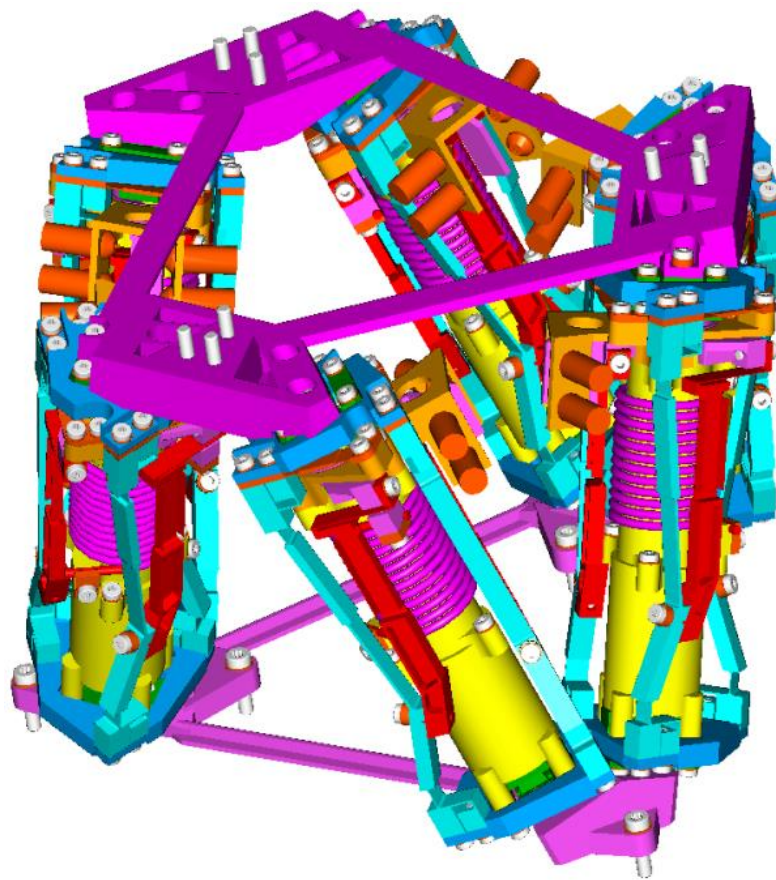


Abbildung 20: 3D-CAD-Image des ECHO-Mechanismus[RUAG Space Austria]

Da die Choppfrequenz das Messen der elektrischen Größen stören kann, soll ein passiver elektrischer Filter verwendet werden. Dieser Filter wird direkt an die Ausgangsleitungen der SMCI 36 geschaltet. Bisher wurde die Platine, die diesen Filter beherbergt, als Lochrasterplatine ausgeführt und von Hand verkabelt. Da sich die SMCI 36 als für die Anwendung geeignet erwiesen hat und bereits in drei Projekten Erfahrungen mit geeigneten Layouts zur Beschaltung gemacht wurden, soll eine einheitliche Platine designed werden, die auch in zukünftigen Projekten Verwendung finden kann. Folgende Anforderungen sind von der Platine zu erfüllen:

- Aufnahme des Filters
- Aufnahme des Nanotec SMCI 36 Moduls
- Versorgung und Beschaltung der SMCI 36
- Aufnahme der Messleitungen
- Aufnahme der Messwiderstände
- einfache Reproduzierbarkeit der Platinen
- einheitliche Schnittstellen
- Modularität

Die Motorleitungen und die Endschalterleitungen müssen voneinander getrennt ausgeführt sein, um induzierte Fehlerströme zu vermeiden. Es sollen Anschlüsse mit dem Standard D-SUB zum Einsatz kommen.

Das EGSE ist als reine Steuerung zu konzipieren. Die Messung der elektrischen Größen wird durch ein separates Messinstrument bewerkstelligt. Das EGSE muss die Möglichkeit bieten, diese Messgrößen abzugreifen. D.h., dass ein geeignetes Interface vorhanden sein muss, um ein sicheres fehlerfreies Messen zu ermöglichen. Folgende elektrische analoge Größen sind zu messen:

- alle Phasenströme von allen sechs Motoren
- alle Phasenspannungen von allen sechs Motoren

Außerdem sollen folgende binäre Signale aus dem Gehäuse heraus- und hineingeführt werden können:

- Endschalersignale sollen herausgeführt werden, um als Triggersignal dienen zu können.
- Ein Signaleingang muss für jede der sechs SMCI 36 vorhanden sein, um eine Temperaturnotabschaltung, die vom separaten Messsystem bewerkstelligt wird, vornehmen zu können.

Um den Losbrechstrom jedes einzelnen Motors messen zu können, soll eine siebente, stark vereinfachte Steuerung zum Einsatz kommen, die betriebsintern als Starting-Current bezeichnet wird. Diese Steuerung soll durch manuelle Schalter mit jedem

einzelnen der sechs Motore verbunden werden können. Diese soll die Möglichkeit bieten, die Motore im Vollschritt-, Halbschritt- und Wavedrive- Modus zu betreiben. Die Betriebsspannung für einen Motor muss dabei analog einstellbar sein.

Da der fertige ECHO-Mechanismus erstens sehr teuer ist und zweitens nur Bewegungen im Bereich von einigen 1/10 mm ausführt, muss die Betriebsfähigkeit der Steuerung an einem Testhexapoden demonstriert werden. Zu diesem Zweck wird ein möglichst einfacher Hexapode gebaut, der mit dem EGSE betrieben werden kann. Die Bewegungen sollen mit freiem Auge erkennbar sein. Die grundsätzlichen Testabläufe sollen an diesem Hexapoden durchgeführt werden können, bevor sie am eigentlichen ECHO-Mechanismus zum Einsatz kommen. Damit wird sichergestellt, dass Fehler in der Programmierung oder Fertigung der Steuerungen, die beim ECHO-Mechanismus zu einem fatalen Crash oder Fehlerstrom führen könnten, vorzeitig erkannt werden.

4 EGSE

Das EGSE muss den in Kapitel 3 vorgestellten Anforderungen genügen. In der Konzipierung wird zunächst das EGSE für den S4-Mechanismus als Vorbild verwendet. Die Gesamtheit aller Komponenten des ECHO EGSE stellt im Grunde eine Steuerung für einen Hexapode dar. Diese Steuerung bietet die Möglichkeit, spezielle Messaufgaben zu erfüllen und alle realen Betriebszustände des Hexapoden zu simulieren.

4.1 Konzeptionierungsphase

Das Schema für das S4-EGSE wurde auf sechs Schrittmotore erweitert. Mit diesem anfänglichen Konzept wurden die einzelnen Komponenten aufgearbeitet und den Anforderungen entsprechend abgeändert bzw. neugestaltet. Zu diesem Zweck wurde die Software Eagle von CAD-Soft in einer freien Studentenversion eingesetzt.

Eagle ist ein Programm zum Design von Schaltkreisen und Platinen. Die Struktur des Programms ermöglicht es, Pläne in unterschiedlichen Hierarchieebenen zu erstellen. Damit ist es sehr gut möglich, Konzepte von großen übergreifenden Strukturen zu erstellen und währenddessen einzelne Komponenten als Blackbox zu behandeln. Durch Bibliotheken, die von unterschiedlichsten Herstellern zur Verfügung gestellt werden, können auf der untersten Eben die eigentlichen Schaltungen in Form eines Schaltplans (siehe Abbildung 22) verhältnismäßig einfach erstellt werden. Der grundsätzliche Aufbau des EGSE ist in Abbildung 21 zu sehen. Diese Abbildung skizziert die oberste Ebene in der Eagle-Hierarchie.

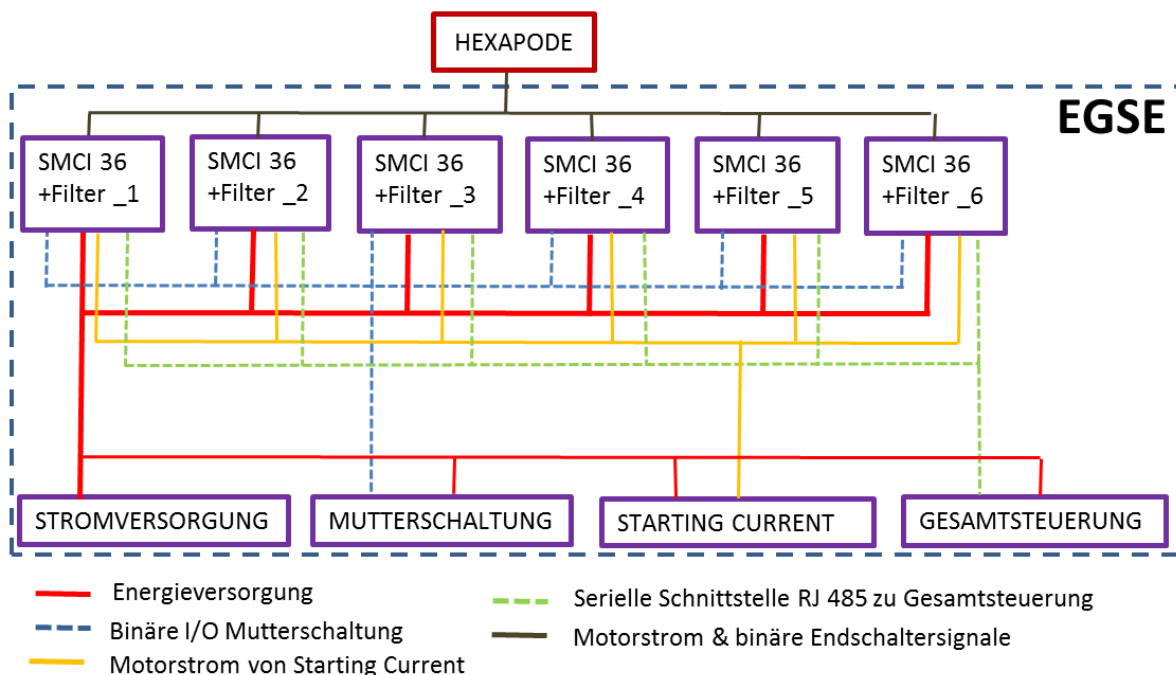


Abbildung 21: Komponenten des EGSE

In Tabelle 4 sind die in Abbildung 21 dargestellten Hauptbaugruppen des EGSE aufgelistet.

Hauptbaugruppen	Funktion
SMCI 36 + Filter	Schrittmotorsteuerung von Nanotec und elektrischer Filter. Beide Komponenten sind auf einer Platine verbaut
Stromversorgung	Abdeckung der unterschiedlichen Spannungsniveaus durch mehrere Netzteile
Mutterschaltung	Ermöglichung eines sicheren und für die einzelnen Komponenten beschädigungsfreien Betriebs
Starting Current	Schrittmotorsteuerung zur Messung des Losbrechstromes
Gesamtsteuerung	Steuerung des gesamten Versuchsablaufs

Tabelle 4: Hauptbaugruppen des ECHO EGSE

Die Gesamtsteuerung übernimmt die Aufgabe, die im S4-EGSE vom Steuerungs-PC übernommen wurde (siehe dazu mehr in Kapitel 7). Die Mutterschaltung übernimmt die Aufgabe die beim S4-EGSE von der SPS wahrgenommen wurde.

Für den Aufbau des gesamten Betriebsschemas wurden die einzelnen Komponenten vorerst als Blackboxes mit denselben Eigenschaften wie im S4-EGSE behandelt. Durch diese Betrachtung kann der Entwurf weiter präzisiert werden. Im Laufe dieser Phase werden gewisse Eigenschaften der Blackboxes geändert, ohne darauf im Detail einzugehen. Parallel dazu wird bereits die Platine für den elektrischen Filter entworfen und damit die Blackbox dieser Komponente auskonstruiert. Darauf wird in Kapitel 4.2 weiter eingegangen.

Der Einbau der Steuerung erfolgt in ein sogenanntes 19-Zoll-Rack des Unternehmens Schorf. 19 Zoll bezieht sich dabei auf das Rastermaß dieser Gehäusefamilie. Schorf stellt ein sehr durchdachtes System zur Verfügung, das es dem Benutzer ermöglicht, alle gängigen Bauteile einfach im Inneren des Gehäuses zu platzieren und zu befestigen. Die Gehäuse werden je nach Wahl mit einem passiven oder aktiven Wärmehaushaltssystem zur Verfügung gestellt. Um ein einheitliches Bild zu wahren, und weil von mehreren Abteilungen im Unternehmen bereits gute Erfahrungen mit diesen Gehäusen gemacht wurden, ist auch für diese Arbeit ein derartiges Gehäuse (siehe Abbildung 30) gewählt worden.

Das Endergebnis dieser Phase ist ein genauer Konzeptplan. Neben den Informationen aus Abbildung 21, sind alle Informations- und Energieflüsse sowie alle zusätzlichen, für den Betrieb notwendigen Komponenten darin enthalten. Des Weiteren sind darin

die einzelnen Blackboxes in grobe Teilkomponenten zerlegt und die Interfaces zur Mutterverdrahtung sind bereits genauer spezifiziert. Als Mutterverdrahtung wird die gesamte Kabelführung im Inneren des Gehäuses bezeichnet, welche die einzelnen Blackboxes mit einander verbindet. Der genaue Plan für die Mutterverdrahtung hängt maßgeblich von den Interfaces der einzelnen Komponenten ab.

4.2 Platinendesign für SMCI 36

In Kapitel 2.3 und 3 wurde bereits auf die Funktion des Filters und auf die Anforderungen für die Platine eingegangen. Es kommen Europlatinen mit den Maßen 100 mm mal 160 mm nach DIN 41494 zum Einsatz. Diese Platinen werden mit einem Anschluss nach DIN 41612 Bauform C ausgestattet. Es handelt sich um einen dreireihigen Stecker, männlich, mit 32 Pins je Reihe. Dies ergibt insgesamt 96 Pins. Da für diese Anwendung weniger Pins benötigt werden, wurde die Bauform C gewählt. Hierbei wird die mittlere Reihe nicht bestückt, somit stehen nur 64 Pins zur Verfügung. Die Platine wird mit folgenden Baugruppen bestückt.

Komponente	Beschreibung
Filter	Tiefpass-Filter
Relais ON/OFF	Schaltung der Stromzufuhr für die SMCI 36
Relais SWITCH	Umschaltung zwischen der SMCI 36 und der Starting Current
Stecker für Frontpanel (20-polig)	Verbindung zwischen der Platine und dem Frontpanel
Stecker für SMCI 36 (20-polig)	Verbindung der SMCI 36 mit der Platine
SHUNT Messwiderstände (0,5 Ω)	Messung der Phasenströme
Steckleiste (64-Pin)	Interface mit Mutterverdrahtung (nach DIN 41612 Bauform C)

Tabelle 5: Komponenten der Filterplatine

Der Filter wird ohne Änderungen von den vorherigen Projekten übernommen. Das Relais ON/OFF wird so gewählt, dass es den maximalen Versorgungsstrom der SMCI 36, von 0,5 A bei 70 V schalten kann. Auslegungsgrundlage für das Relais SWITCH sind die vier Phasenströme je Motor von 0,25 A bei 70 V. Dieses Relais ermöglicht es, den Schrittmotor entweder mit der SMCI 36 oder mit der Starting Current zu verbinden, ohne die Motorleitungen umstecken zu müssen.

Am Frontpanel befindet sich der Schalter ON/OFF, welcher indirekt das Relais ON/OFF schaltet, und der Schalter SWITCH, welcher indirekt das Relais SWITCH schaltet. Des Weiteren befinden sich hier die Ausgänge zum Motor, die Messanschlüsse der Shunts, die Sicherungen für die Phasenströme und die LEDs, die den Status der Relais anzeigen. Auf die Schalter und die indirekte Schaltung der Relais wird in Kapitel 4.4.3 genauer eingegangen. Die LEDs zeigen den Zustand der Relais an. Die Messanschlüsse ermöglichen es, die Shunts mit einem Messgerät zu verbinden. Ein Shunt ist ein sehr genauer Widerstand mit einer maximalen Abweichung von $\pm 0,5\%$. Durch den Spannungsabfall an diesem Widerstand kann mit dem Ohmschen Gesetz direkt der Strom berechnet werden. Die Sicherungen schützen die Steuerung vor eventuellen Stromspitzen, die sie zerstören könnten. In Abbildung 31 unten links ist das Frontpanel der ersten Steuerung zu erkennen. Insgesamt sind 19 Pins nötig, um alle am Frontpanel vertretenen Funktionen mit der Platine zu verbinden. Bei der gesamten Gestaltung der Platine wurde Wert darauf gelegt, die Ground-Anschlüsse ausreichend groß zu dimensionieren, um eine unzulässige Erwärmung zu vermeiden.

Die SMCI 36 ist ebenfalls über einen 20-poligen Stecker mit der Platine verbunden. Dabei handelt es sich um die vier Phasenleitungen, die Stromversorgung, die Ground-Leitung und binäre sowie analoge Ein- und Ausgänge. Von diesen Ein- und Ausgängen sind ausschließlich drei binäre Eingänge für die Endschalter und die Temperaturnotabschaltung belegt. Alle anderen Ein- und Ausgänge können bei möglichen Erweiterungen oder Anpassungen des EGSEs bzw. in anderen Projekten verwendet werden. Die Stromversorgung der SMCI 36 ist mit einem Kondensator gepuffert. Im Betrieb der Schrittmotore treten durch die Umpolung der bipolaren Motorwicklung Spannungsspitzen auf. Diese werden von den Steuerungen wieder an das Versorgungsnetz zurückgegeben. Der Kondensator dient als Puffer und glättet diese Spitzen (siehe dazu Kapitel 2.2). Die 64-Pin-Steckleiste stellt das Interface der Blackbox, mit der Bezeichnung „Filterplatine“, für die Mutterverdrahtung dar.

Wie weiter oben beschrieben, können mit der Software Eagle Schaltpläne erstellt werden. Auf der untersten Ebene können damit fertige PCBs (Printed Circuit Board) erstellt werden. Eagle stellt zu diesem Zweck zwei Oberflächen zur Verfügung: Das Design-Area, indem Schaltpläne gezeichnet werden können, und das Routing Area, indem die Platine gestaltet werden kann. Im Design-Area können mittels „draganddrop“ Komponenten aus den Bibliotheken platziert und verbunden werden. Für diese Bibliothek können auch eigene Bauteile gezeichnet werden. Im Design-Area wird ausschließlich die richtige elektrische Verbindung der einzelnen Komponenten vorgenommen. In Abbildung 21 ist der Schaltplan der verwendeten Filterplatine zu sehen. Man kann hier auch deutlich erkennen, dass Eagle, der besseren Übersicht wegen, mit Benennungen der einzelnen Netze arbeitet. Als Netz wird in Eagle eine leitende Verbindung zwischen einem oder mehreren Punkten bezeichnet.

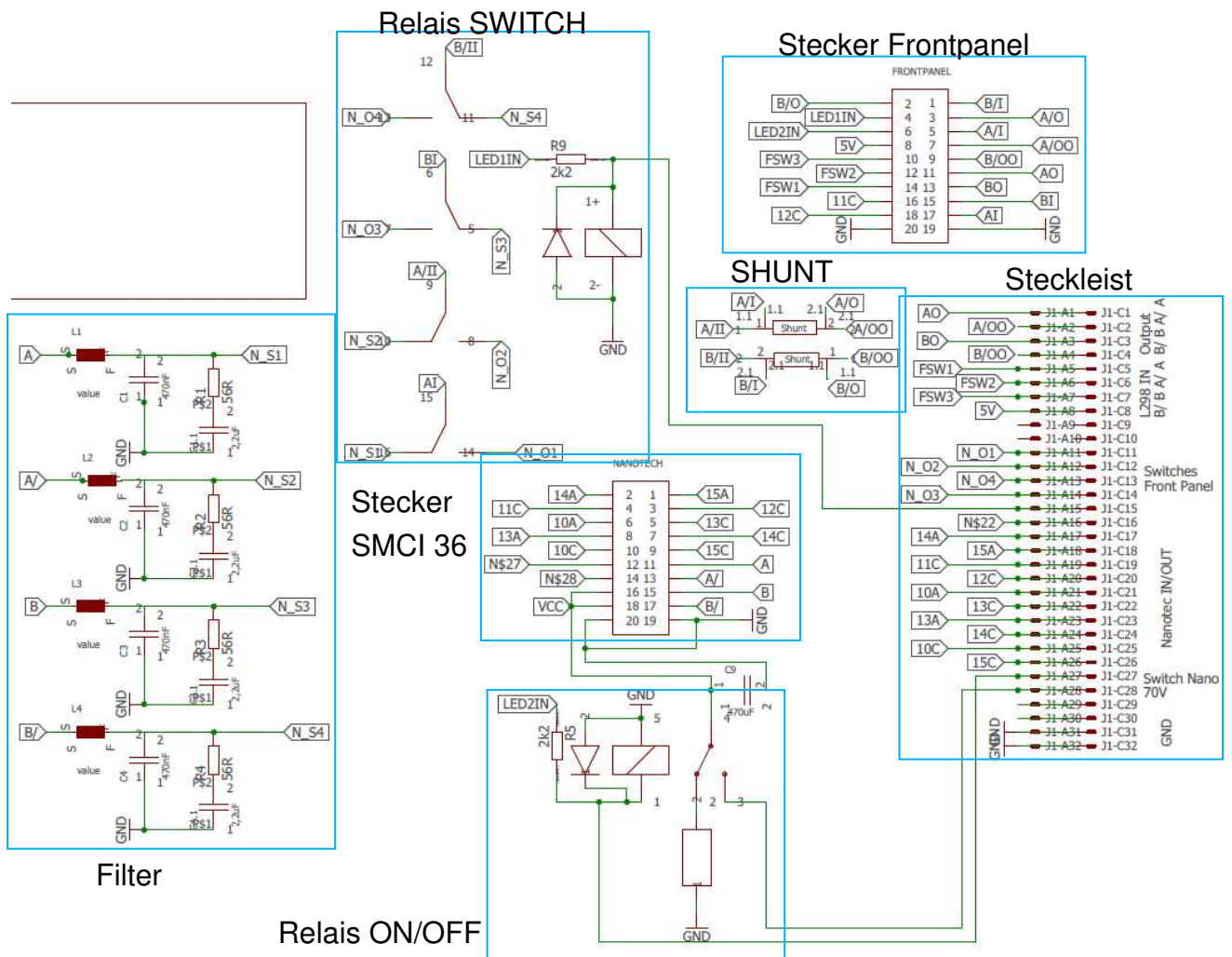


Abbildung 22: Schaltplan der Filterplatte

Im Routing-Area kann ein Plan von einem bereits vorhandenen Schaltplan abgeleitet werden. Alle Elemente, die im Schaltplan aus der Bibliothek mittels „draganddrop“ entnommen wurden, sind hier mit ihrem realen Footprint abgebildet. Als Footprint wird in diesem Fall die Unterseite des Bauteils, die später auf der Platine liegt, bezeichnet. Das beinhaltet eine Angabe aller elektrischen Kontakte zueinander und zu den Bauteilgrenzen. In diesem Footprint werden auch die Durchmesser der Kontakte sowie die zum Verlöten notwendigen Flächen dargestellt. Der Footprint ergibt eine Negativ-Form in die das Bauteil später genau passt und eingebaut werden kann.

Abbildung 23 stellt das Layout der eingesetzten Platine dar. In Rot sind alle Leiterbahnen auf der Oberseite der Platine und in blau sind alle Leiterbahnen auf der Unterseite dargestellt. In grau sind alle Elemente dargestellt, die auf der Platine platziert werden müssen. Die Anschlüsse dieser Elemente sind als grüne Kreise dargestellt. Dabei sind die Flächen innerhalb der Ringe die Bohrungen für die Durchsteckmontage der Bauteile. Die grünen Flächen sind die Lötflächen, die zur Verfügung stehen, um die Bauteile anzulöten.

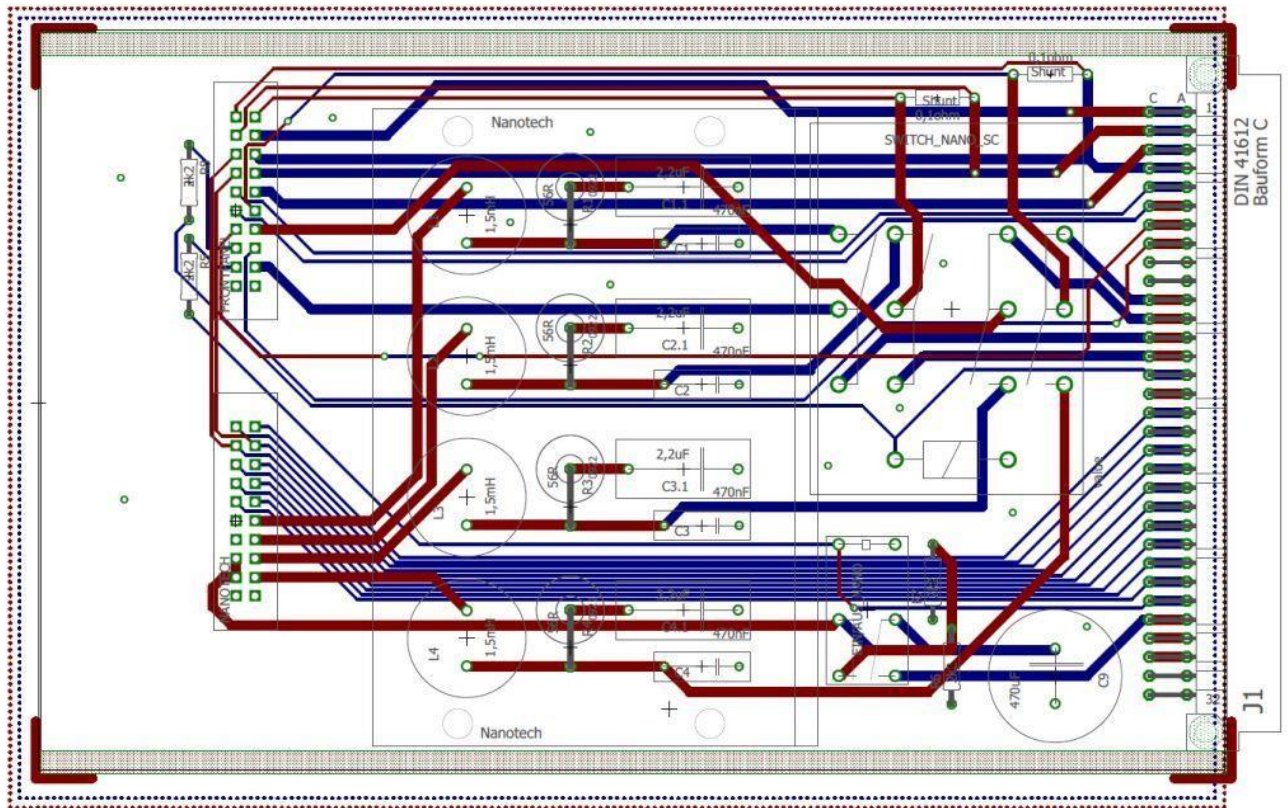


Abbildung 23: Darstellung der Filter-Platine in Eagle

Die Platine selbst ist vor der Herstellung eine Epoxid-Faser-Verbund-Platte mit einer deckenden Kupferschicht von $35\ \mu\text{m}$ auf Ober- und Unterseite. Gemäß dem Plan aus Abbildung 23 werden alle Durchgangsbohrungen ausgeführt. Im Anschluss wird auf Ober- und Unterseite mit einer Fräsmaschine die Kupferschicht so abgetragen, dass die Leiterbahnen übrigbleiben. Anschließend werden die Bohrungen und alle Lötflächen verzinkt, die restliche Fläche wird mit einem Lötstopplack überzogen. Dieser Lack verleiht den Platinen das typische grüne Aussehen. Um den Platzverbrauch auf der Platine gering zu halten, versucht man die Lötflächen möglichst klein zu halten. Das Verlöten der Bauteile von Hand wird aber durch größere Lötflächen erheblich vereinfacht.

Durchgangslöcher, die eine Leiterbahn auf der Oberseite mit einer Leiterbahn auf der Unterseite verbinden, werden Via genannt. Es wurde versucht, die Zahl der Vias so gering wie möglich zu halten, da diese den Preis erhöhen, die strukturelle Stabilität reduzieren und außerdem Platz benötigen.

Den Vorgang des Verlegens der Leiterbahnen in der Software nennt man Routen. Schlüsselfaktoren für das Routen sind die Leiterbahndicke sowie der nötige Abstand von einer Leiterbahn zur Nächsten. Die Dicke wird durch den zu bewältigenden Strom bestimmt. Die Software schlägt dabei $1\ \text{mm}$ Dicke pro A vor. Grundsätzlich hängt die Dicke von der möglichen Strombelastung ab. Dies ist ein materialspezifischer Wert in A/mm^2 Leiterquerschnitt. Eine zu hohe Strombelastung führt dabei zu einer

unzulässigen Erwärmung des Leiters. Für Kupfer ergibt eine überschlägige Berechnung bei 35 μm Dicke eine Leiterbahnbreite von knapp unter 1 mm. Der Abstand zwischen den Leiterbahnen hängt von der Spannung ab. Die einzige Isolierung zwischen zwei Bahnen ist der Luftspalt dazwischen bzw. durch den Einsatz von Lötstopplack auch diese Lackschicht. Bei zu geringem Abstand zwischen den Bahnen kann ein Funkenüberschlag stattfinden und zu einem Kurzschluss führen. Die vorgegebenen Abstände werden allerdings auch vom verwendeten Werkzeug bestimmt und der Mindestabstand, der durch die Bearbeitung entsteht, ist wesentlich höher als der elektrisch notwendige Abstand.

Eagle stellt einen Autorouter zur Verfügung, damit können automatisch alle Leiterbahnen verbunden werden. Mit zunehmender Komplexität des Schaltplans kann es sein, dass der Autorouter des Programms nicht mehr in der Lage ist, alle Leiterbahnen zu verbinden. Außerdem werden dadurch selten optimale Ergebnisse erzielt. Durch händisches Routen kann die Anzahl der Vias von 36 nach dem Autorouten auf acht reduziert werden (siehe Abbildung 23). Außerdem wird es dem Anwender durch händisches Routen ermöglicht, die Platine nach seinen Kriterien übersichtlich zu gestalten.

4.3 Starting-Current

Wie bereits auf Seite 32 beschrieben, ist die Starting-Current eine eigene Schrittmotorsteuerung, die zusätzlich zu den sechs vorhandenen Nanotec Steuerungen eingebaut werden soll. Im normalen Betrieb des Hexapoden kommt diese Steuerung nicht zum Einsatz. Zweck der Starting-Current ist es, die Losbrechspannung bzw. den Losbrechstrom zu ermitteln. Als Losbrechspannung wird die Spannung bezeichnet, bei der der Motor aus dem Stillstand den ersten Schritt macht. Der Grund für den Einsatz einer eigenen Steuerung hierfür ist, dass die SMCI 36-Steuerung nur in 1% Schritten des maximal möglichen Stroms eingestellt werden kann. Die Steuerung liefert maximal 2,2 A. Damit sind diskrete Schritte von 0,022 A möglich. Im schlechtesten Fall besteht damit die Möglichkeit, den Losbrechstrom um 0,022 A zu hoch zu bestimmen. Das entspricht 8,8% des maximalen Phasenstroms von 0,25 A.

Der Motorstrom ist direkt proportional zum Motordrehmoment. Damit kann durch Messen der Spannung und des Stroms auf das Losbrechdrehmoment geschlossen werden. Das Losbrechdrehmoment gibt Aufschluss über die Reibung und den Widerstand im System. Die Reibung im System setzt sich aus allen am bewegten Mechanismus beteiligten Komponenten zusammen. Im Fall des Testhexapoden sind das:

- Linearspindel
- Führung

- Kugelgelenke der angesteuerten Achse
- Kugelgelenke aller andere Achsen

Beim ECHO-Mechanismus wird die Motordrehbewegung mit einem zweistufigen Planetengetriebe untersetzt und anschließend über Kniehebel in eine oszillierende Bewegung umgesetzt. Alle Gelenke im Mechanismus sind als Festkörpergelenke ausgeführt. Ein Festkörpergelenk stellt im System eine Feder mit eigener Federkennlinie dar.

Des Weiteren ist die Belastung als Resultat der Gewichtskraft für jede einzelne Strebe von der Position der Plattform abhängig. Selbst bei einer Position, bei der nur der Z-Wert von null verschieden ist und damit alle Streben die gleiche Belastung erfahren, ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Winkel aller Achsen in Abhängigkeit von Z unterschiedliche Belastungen.

Durch regelmäßiges Messen der Losbrechspannung kann die Änderung des Losbrechmoments über der Zeit aufgetragen werden. Damit ist ein Rückschluss auf die Veränderung der inneren Reibung des Systems und in weiterer Folge eine Verschleißmessung möglich. Es kann dadurch auch eine mögliche Beschädigung des Gesamtmechanismus festgestellt werden.

Um die genaue Losbrechspannung zu messen, wird folgendermaßen vorgegangen: Im Stillstand wird der Motor mit einer Schrittsequenz bestromt. Die Versorgungsspannung für die Treiberendstufe ist dabei gleich null. Die Versorgungsspannung wird durch ein analog steuerbares Netzteil mit maximal 24 V Ausgangsspannung zur Verfügung gestellt. Die Spannung wird nun langsam erhöht, bis der Motor den ersten Schritt durchführt. Damit ist die Starting-Current eine spannungsgeführte Steuerung, die für den Konstantspannungsbetrieb vorgesehen ist.

Um das Losbrechmoment exakt und wiederholgenau bestimmen zu können, muss der Test immer in der gleichen Lage des Mechanismus durchgeführt werden. Begründet ist dies in der oben beschriebenen Federwirkung aller Gelenke und der Änderung der Strebenbelastung durch die Gewichtskraft in Abhängigkeit von der Position.

Nach den ersten Messungen wird die Versorgungsspannung am Beginn des Tests üblicherweise nicht auf null, sondern knapp unterhalb der bisher ermittelten Losbrechspannung gesetzt. Dadurch kann Versuchszeit eingespart werden.

Da am Mechanismus keine Drehgeber verbaut sind, wird die Bewegung über die induzierte Spannung in der sekundären Wicklung gemessen. Dieser Vorgang läuft automatisiert ab. Das Messgerät Dewetron ist so programmiert, dass eine Steuerspannung für das steuerbare Netzteil ausgegeben wird. Parallel dazu werden Phasenstrom und Phasenspannung der primären und der sekundären Motorwicklung gemessen. Nachdem über die induzierte Spannung in der sekundären Wicklung eine

Bewegung des Motors nachgewiesen werden kann, wird der Vorgang von Hand beendet.

4.3.1 Starting-Current im S4 EGSE

Die Starting Current für das S4 EGSE setzt sich aus den Komponenten, die in Tabelle 6 aufgezählt sind, zusammen. In Tabelle 7 und Tabelle 8 werden die Spannungsversorgung und die Signalflüsse aufgelistet.

IC (integrated circuit) der Starting-Current	Funktionsbeschreibung
NE555	Taktgeber: gibt in einer bestimmten Frequenz ein binäres Rechtecksignal aus. Durch äußere Beschaltung mit veränderbaren Widerständen und Kapazitäten kann die Frequenz der Ausgabe eingestellt werden.
L297	Gibt eine Sequenz für Half-/Full-/Wave-Betrieb in Form von vier binären Signalen aus (siehe Abbildung 13, Abbildung 14 und Abbildung 15). Benötigt Taktvorgabe-/Clock- Signal von NE555.
L298	H-Vollbrücken-Verstärkerschaltung der Eingangssequenz von L297 entsprechend der Versorgungsspannung; wird auch als End- oder Leistungsstufe bezeichnet.

Tabelle 6: ICs der Starting-Current im S4 EGSE

Spannungsversorgung	Funktion	Beschreibung
0-24V	Versorgungsspannung	Wird vom steuerbaren Netzteil geliefert, versorgt L298.
5V	Logikspannung	Versorgt die Glieder, die <u>nicht</u> der Leistungsübertragung dienen.

Tabelle 7: Spannungsversorgung der Starting-Current im S4 EGSE

Signale	Funktion	Beschreibung
Clock-Signal	Binärer Eingang für L297	Ausgang von NE555; wird als Referenzsignal vom Messgerät miterfasst.
Half/Full/ Wave	Binärer Eingang für L297	Umschaltmöglichkeit zwischen den einzelnen Sequenzen.
Frequenz	Analoger Eingang für NE555	Änderung der Frequenz des Clock-Signals durch ein Potentiometer.
CW/CCW (ClockWise /CounterClock Wise)	Binärer Eingang für L297	Gibt die Drehrichtung der Sequenz an.

Tabelle 8: Signale der Starting-Current im S4 EGSE

Die Kombination aus L297 und L298 von SGS wird als „...*schon beinahe klassisches Schaltungsbeispiel einer 2-Phasen Konstantstromansteuerung.*“ ([19], S.159) bezeichnet. Durch nicht Beschalten einzelner Eingänge der beiden ICs wird aus der Schaltung für Konstantstrom-Ansteuerung eine Schaltung für Konstantspannungs-Ansteuerung. Abbildung 24 zeigt den schematischen Aufbau der Schaltung.

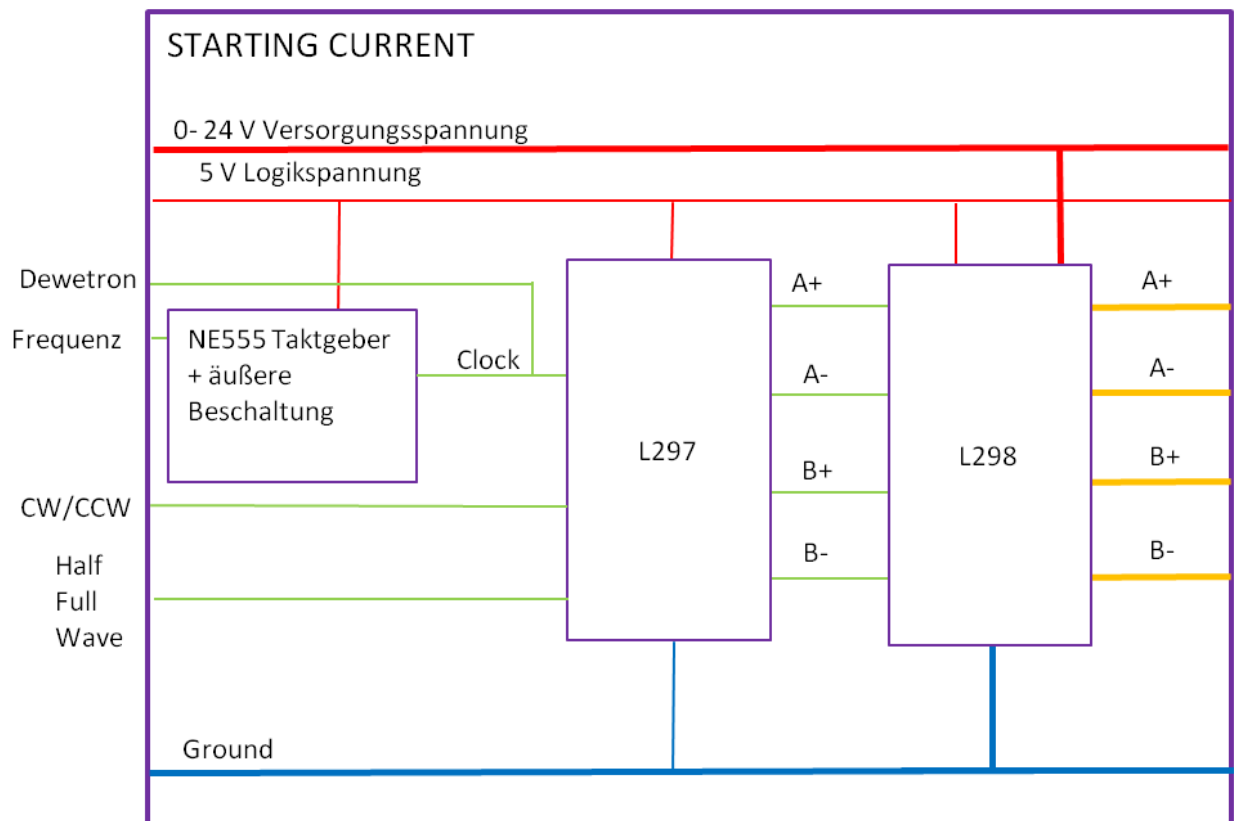


Abbildung 24: Schema der Starting Current im S4 EGSE

Der IC NE555 ist ein Taktgeber. Durch äußere Beschaltung mit Widerständen und Kondensatoren können die beiden Zeitkonstanten für den Taktgeber eingestellt werden. Indem statt fixer Widerstände Potentiometer verwendet werden, kann man die Zeitkonstanten in gewissen Grenzen beeinflussen.

4.3.2 Entwicklung für das ECHO-EGSE

Für die Starting-Current im ECHO-EGSE werden die beiden ICs für die Schrittsequenz, also der NE555 und der L297, durch einen Mikrocontroller (μC) ersetzt. Die Leistungsstufe L298 wird weiterhin verwendet.

Als Mikrocontroller wird ein Arduino UNO, mit einem Chip des Unternehmens Atmel vom Typ ATmega328 [28] verwendet. Die Starting-Current setzt sich damit aus den Komponenten aus Tabelle 6 zusammen.

Komponente	Art	Beschreibung
L298	IC	H-Vollbrücken-Verstärkerschaltung der Eingangssequenz vom μC entsprechend der Versorgungsspannung.
Arduino UNO	μC	Ersetzt die ICs L297 und NE555. Ermöglicht flexible Programmierung der Schrittsequenzen bzw. aller Parameter, die in der Schaltung für das S4-EGSE durch Wahl von Widerständen und Kapazitäten unveränderlich vorgegeben sind.

Tabelle 9: Komponenten der Starting-Current im ECHO-EGSE

Die Arduino Mikrocontroller können mit der Software Arduino IDE programmiert werden. Grundsätzlich werden Mikrocontroller in Maschinencode programmiert. Das führt erstens dazu, dass die Programmierung sehr langwierig und z.T. unübersichtlich sein kann, und zweitens dazu, dass das Datenblatt des jeweiligen Chips sehr genau studiert werden muss. Das Datenblatt des Atmel ATmega 328 z.B. hat 435 Seiten. Die Software Arduino IDE ermöglicht es, in gewohnter Weise zu programmieren. Die Software baut dabei auf der Programmiersprache C auf. Objektorientiertes Programmieren ist daher nicht möglich, auch Threads sind nicht möglich. Threads sind Programmabschnitte, die zeitgleich parallel ablaufen und so das Bearbeiten mehrerer Aufgaben zur gleichen Zeit ermöglichen. Das Programm selbst kann auf jedem PC geschrieben werden und wird mittels COM-Port über eine USB-Schnittstelle an den μC übermittelt. Ab dem Moment, ab dem der μC mit Strom versorgt wird, beginnt das Programm abzulaufen. Die Stromversorgung kann über den USB-Anschluss erfolgen, solange der PC eingeschaltet ist. Dies erleichtert die Programmierung ungemein, da direkt nach dem Hochladen des Programms ohne Umbauten ein Versuch möglich ist, das Programm abzuspielen. Der μC kann auch über ein eigenes Netzgerät bzw. direkt an einem Pin mit 12 V versorgt werden.

Der μC selbst hat zehn analoge 5 V Eingänge, die mit 10 Bit aufgelöst werden können. 10 Bit ergeben 1024 digitale Zustände, d.h. eine Auflösung von 4,88 mV. Des Weiteren befinden sich darauf noch 16 digitale I/O (Input/Output) -Pins, die 12 V Versorgung, zwei 5 V Senseeingänge, der 5 V Logikspannungsausgang und ein Reset-Eingang. Diese Senseeingänge sind notwendig, falls die 5 V Logikspannung nicht direkt vom Controller selbst zur Verfügung gestellt wird.

Die Meisten der verwendeten ICs und μCs haben derartige Senseeingänge, die als Signalpegelreferenz dienen. Ein IC z.B. erwartet ein binäres Signal, welches entweder den Zustand HIGH (=5 V) oder Low (= 0 V) haben kann. Zu diesem Zweck ist der IC mit der Ground-Leitung (entspricht 0 V) verbunden. Da der 5 V Pegel aber abhängig von der Belastung schwanken kann, ist es möglich, dass manchmal 4,8 V und manchmal 5,2 V anliegen. Um den Zustand HIGH trotzdem eindeutig zuordnen zu

können, muss daher der jeweilige IC mit dem aktuellen Logikspannungspegel verbunden sein. Auf diese Art und Weise werden mögliche Schwankungen im Signal egalisiert, da der IC immer nur das Eingangssignal mit dem Referenzwert der Logikspannung vergleicht und nicht mit dem absoluten Wert von 5 V.

Abbildung 25 zeigt das Schema der Starting-Current im ECHO-EGSE. Durch die freie Programmierbarkeit des μC wird die Flexibilität dieser Konfiguration stark erhöht. Es ist auch nach der Fertigstellung der gesamten Schaltung möglich, Veränderungen vorzunehmen, solange die verbaute Hardware dies zulässt. Alle Zeitkonstanten können z.B. beliebig variiert werden. Dieser Umstand wird für die Duty-Cycle-Reduction genutzt.

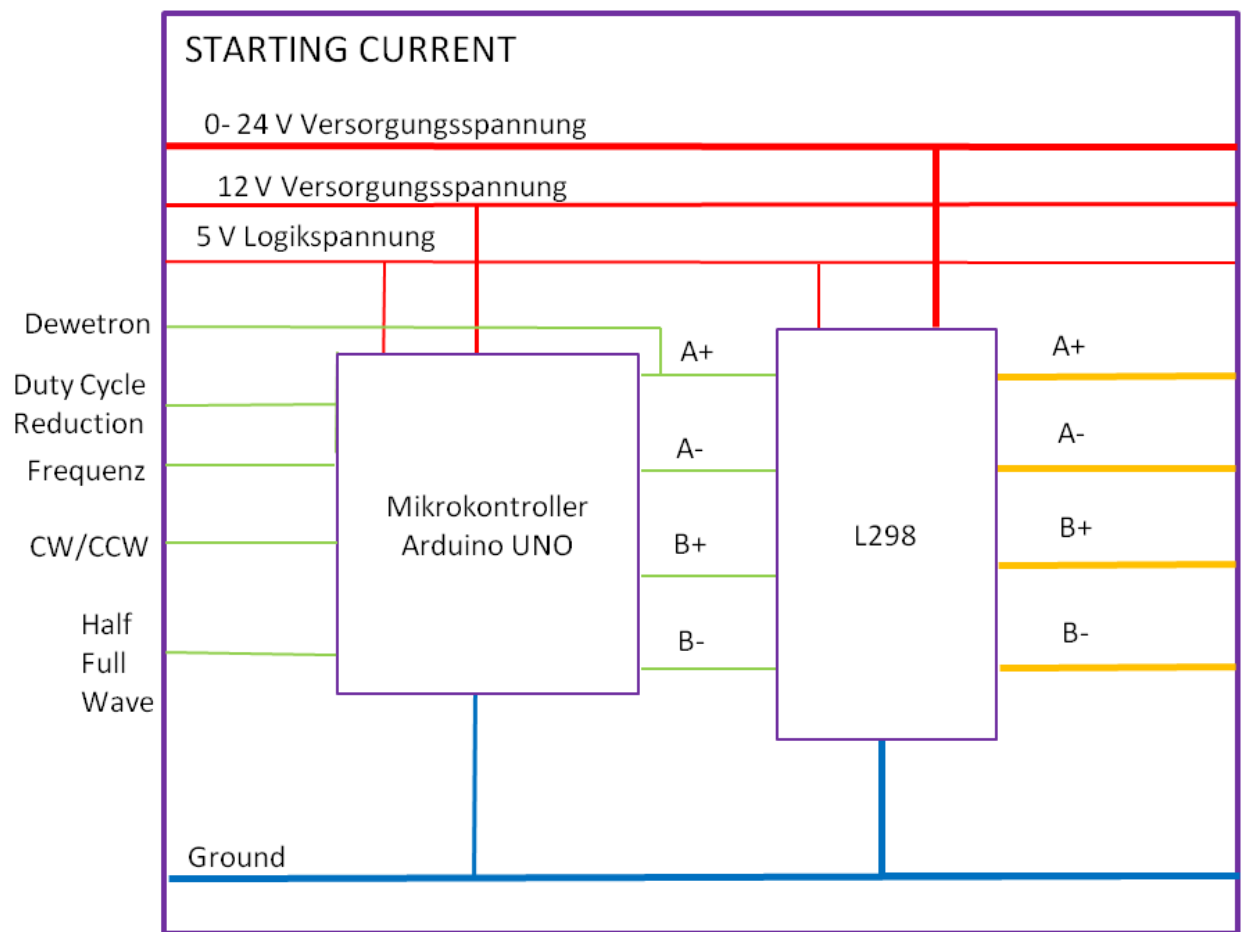


Abbildung 25: Schema der Starting-Current im ECHO-EGSE

In der folgenden Tabelle 10 ist die Spannungsversorgung aus Abbildung 25 genauer erläutert.

Spannungsversorgung	Funktion	Beschreibung
0-24 V	Versorgungsspannung	Wird vom steuerbaren Netzteil geliefert, versorgt L298
12 V	Versorgungsspannung	Versorgt μC
5 V	Logikspannung	Versorgt die Glieder, die <u>nicht</u> der Leistungsübertragung dienen

Tabelle 10: Spannungsversorgung der Starting-Current im ECHO-EGSE

Im Folgenden sind die binären Signale aufgelistet, die zum Betrieb der Starting-Current notwendig sind.

Binäre Signale	Funktion	Beschreibung
CW/CCW	Eingang für μC	Drehrichtung CW/CCW
Half/Full/Wave	Eingang für μC	Umschaltmöglichkeit zwischen den einzelnen Sequenzen
Dewetron	Ausgang zum Messgerät	Miterfassung als Referenzsignal durch Dewetron-Messgerät

Tabelle 11: Binäre Signale der Starting-Current im ECHO-EGSE

Analoge Signale	Funktion	Beschreibung
Duty-Cycle-Reduction	Eingang für μC	Einstellung mit einem Potentiometer (siehe Abbildung 16)
Frequenz	Eingang für μC	Einstellung der Drehfeldfrequenz über ein Potentiometer

Tabelle 12: Analoge Signale der Starting-Current im ECHO-EGSE

Der μC wird zunächst mit Hilfe der in Abbildung 26 dargestellten Versuchsanordnung programmiert und getestet. Dabei werden die Schrittsequenzen des L 297 IC gemäß Abbildung 13 bis Abbildung 15 vom μC ausgegeben. Dies wird mit der roten LED-Reihe simuliert. Mittels Potentiometer kann die Spannung an zwei analogen Eingängen geändert werden. Diese werden als Vorgabe für die Frequenz und die Duty-Cycle-Reduction verwendet (siehe Kapitel 2.2).

In einem zweiten Schritt wird die Sequenz an den L298, welcher mit einem Schrittmotor verbunden ist, übergeben. Während den Versuchen stellt sich heraus, dass die Versuchsanordnung aus Abbildung 26 dafür nicht geeignet ist. Das Steckbrett eignet sich nur für sehr geringe Ströme, da sich die Übergangswiderstände sonst zu stark auf den Betrieb auswirken. Daher wird für diesen Versuch eine eigene Lochrasterplatine gefertigt, die als Ausgangspunkt für die spätere Fertigung der Platine für die Starting-Current dient.

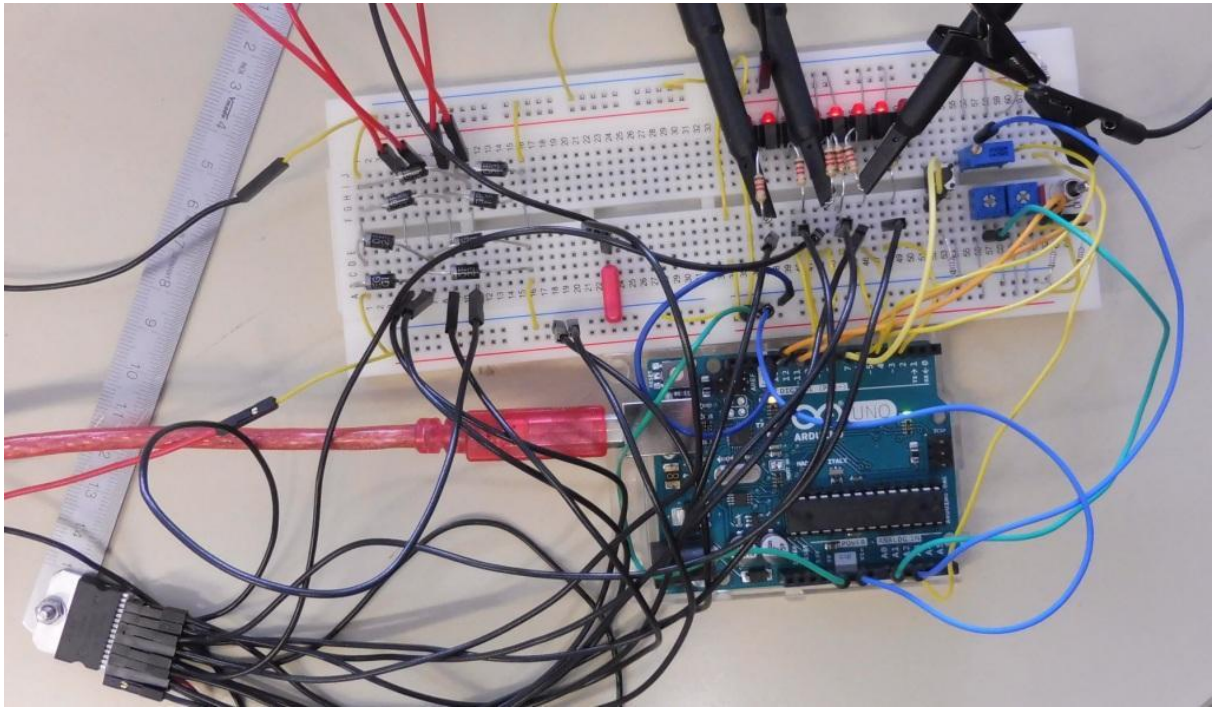


Abbildung 26 : Versuchsaufbau mit Mikrocontroller und L298-Vollbrückenschaltung

Um einen einwandfreien Betrieb zu gewährleisten, ist es notwendig, dass der μC „langsamer“ arbeitet als die Vollbrückenschaltung. Es ist theoretisch möglich, einen Kurzschluss innerhalb der L298-Vollbrücke zu erzeugen indem ein Transistor geöffnet wird, bevor der in der Brücke parallel geschaltete Transistor schließt. Die Ansprechzeit beträgt maximal $2,2 \mu\text{s}$ [18]. Die Zeit, die der μC benötigt, um einem Signalausgang einen Neuen folgen zu lassen, beträgt gemessener Weise $15 \mu\text{s}$. Es ist essentiell, darauf zu achten, die richtige Reihenfolge der Vorgänge einzuhalten. Vorgänge, die in einer Kommandozeile in der Programmierung stehen und damit theoretisch zeitgleich stattfinden sollten, finden in Wirklichkeit um $15 \mu\text{s}$ zu einander versetzt statt.

Die Tests und die währenddessen geleistete Optimierungsarbeit ergeben, dass es möglich ist, mit der Kombination von μC und L298 einen Schrittmotor sicher zu betreiben. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse finden Eingang in die Gestaltung der Platine und der zugehörigen Bedieneinheit, auf die in Kapitel 4.4.4 näher eingegangen wird.

4.4 Ausführung

Nachdem alle Hauptbaugruppen fertig ausgelegt sind und zum Teil schon gefertigt werden, kann aus dem ursprünglichen Konzeptplan aus Kapitel 4.1 ein genauer Plan für die Mutterverdrahtung erstellt werden. Zu diesem Zeitpunkt sind alle Interfaces der Baugruppen fixiert und ändern sich nicht mehr. Im Plan der Mutterverdrahtung ist jedes einzelne verbaute Kabel eingezeichnet, die einzelnen Baugruppen werden als Blackboxes mit vorgegebenem Interface betrachtet. Insgesamt werden bis zum Ende der Arbeit ca. 120 m Kabel im Gehäuse verbaut sein. Im Folgenden werden die einzelnen Baugruppen in ihrer Ausführung beschrieben. Um die Übersichtlichkeit zu erhöhen und Fehlerquellen zu reduzieren, wurde darauf Wert gelegt, dass die Farbkodierung der Kabel, die in den einzelnen Baugruppen verwendet wurde, einheitlich ist und bei der Mutterverdrahtung fortgesetzt wird.

4.4.1 Filter mit SMCI 36 und Frontpanel

Nach dem Plan aus Abbildung 23 (siehe Seite 41) wurden die Platinen beim Unternehmen Printex gefertigt. Mit einer ersten Probefertigung werden Funktionstests durchgeführt. Dabei kann die Platine grundsätzlich als funktionstüchtig eingestuft werden. Es ergibt sich aber an manchen Stellen Optimierungsbedarf. Daher wird das Layout der Platinen vor der endgültigen Bestellung geringfügig geändert.

Jede einzelne Platine wird von Hand mit den elektronischen Bauelementen bestückt. Dabei werden alle Teile von Hand verlötet. Nach dem Zusammenbau werden alle Platinen zunächst mit einem Widerstandsmessgerät überprüft.

Das Frontpanel für die einzelnen Steuerungen wird aus einer Aluminiumplatte von Hand gefertigt. Das Frontpanel ist über einen Aluminiumwinkel und M3-Schrauben mit der Platine verbunden. Im Frontpanel ist auf der Unterseite ein Hebelmechanismus eingebaut, der in eine Lochrasterschiene im Gehäuse eingreift und somit die Platine im eingeschobenen Zustand verriegelt. Auf dem Frontpanel sind Anschlüsse in Form von 5mm-Bananenbuchsen verbaut. Des Weiteren zwei Kippschalter, zwei Leuchtdioden und zwei Sicherungshalter für Glasrohrsicherungen. Abbildung 27 zeigt eine fertig zusammengestellte Platine, mit Frontpanel und SMCI 36-Steuerung. Die Verkabelung der Steuerung fehlt auf diesem Bild noch.

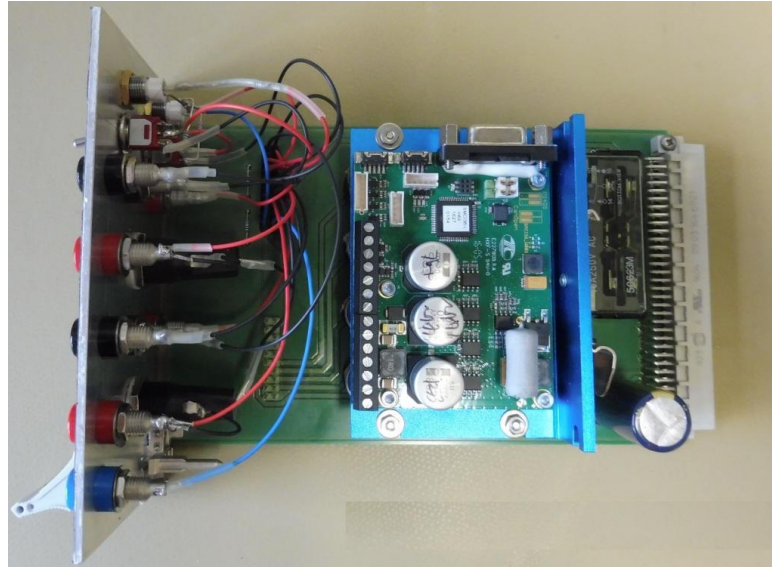


Abbildung 27: SMCI 36 auf der Filterplatine mit Frontpanel

Nach dem vollständigen Zusammenbau der Platinen mit Frontpanel und SMCI 36-Steuerung sowie deren Verkabelung wurden alle Baugruppen auf Funktion getestet. Zu diesem Zweck wurde die Stromversorgung mit einem Labornetzgerät realisiert. Folgende Testprozedur wurde durchgeführt.

Testabschnitt	Beschreibung
Einschalten	Durch Anlegen der Versorgungsspannung wird die SMCI 36 eingeschaltet. Die Steuerung reagiert darauf durch ca. zwei sec. Rotes Blinken.
Verbindungsaufbau	Danach wird über die RS 485-Schnittstelle und einen USB-Adapter eine stabile Verbindung zu einem PC und NanoPro aufgebaut [29].
Konfiguration	In NanoPro werden die zu diesem Zeitpunkt kritischen Parameter der Steuerung eingestellt, z.B. Motorstrom, Schrittsequenz, Schrittwinkel, ...
Testlauf	Danach wird an einem frei drehenden Schrittmotor ein Testlauf durchgeführt. Bei diesem Testlauf werden Motorstrom und Spannung gemessen und auf Unregelmäßigkeiten hin überprüft.

Tabelle 13: Testprozedur für Filter und SMCI 36

Der Zusammenbau und die Bestückung der Platine für den Filter gestalten sich als verhältnismäßig einfach. Die Tatsache, dass alle sechs Steuerungen auf Antrieb funktionieren, unterstreicht, dass die Fehleranfälligkeit im Vergleich zu einer Lochrasterplatine mit manueller Verkabelung reduziert werden konnte. Der

Zusammenbau konnte für alle sechs Platinen auf insgesamt drei Arbeitstage reduziert werden. Im Vergleich dazu dauert der Zusammenbau einer Lochrasterplatine, abhängig von der Tagesverfassung des Arbeiters, zwei bis drei Arbeitstage. Damit kann dieser Aspekt der Diplomarbeit als Erfolg gewertet werden.

4.4.2 Zusammenbau des Gehäuses und der Mutterverdrahtung

Der Zusammenbau des Gehäuses erfolgt in mehreren Stufen. Die Platzierung der Aggregate im Inneren muss so erfolgen, dass alle Anschlüsse an der Außenseite einwandfrei montiert werden können. Zu diesem Zweck wird zuerst fixiert, wo genau auf der Rückseite des Gehäuses der Netzanschluss, der Anschluss für die Motore und der Anschluss für die Endschalter platziert werden. Außerdem sind auf der Rückseite noch Plätze für zwei D-Sub-Stecker mit je 37 Polen vorgesehen. Diese beiden Anschlüsse dienen lediglich als Reserve, falls es zu Erweiterungen des EGSE kommt.

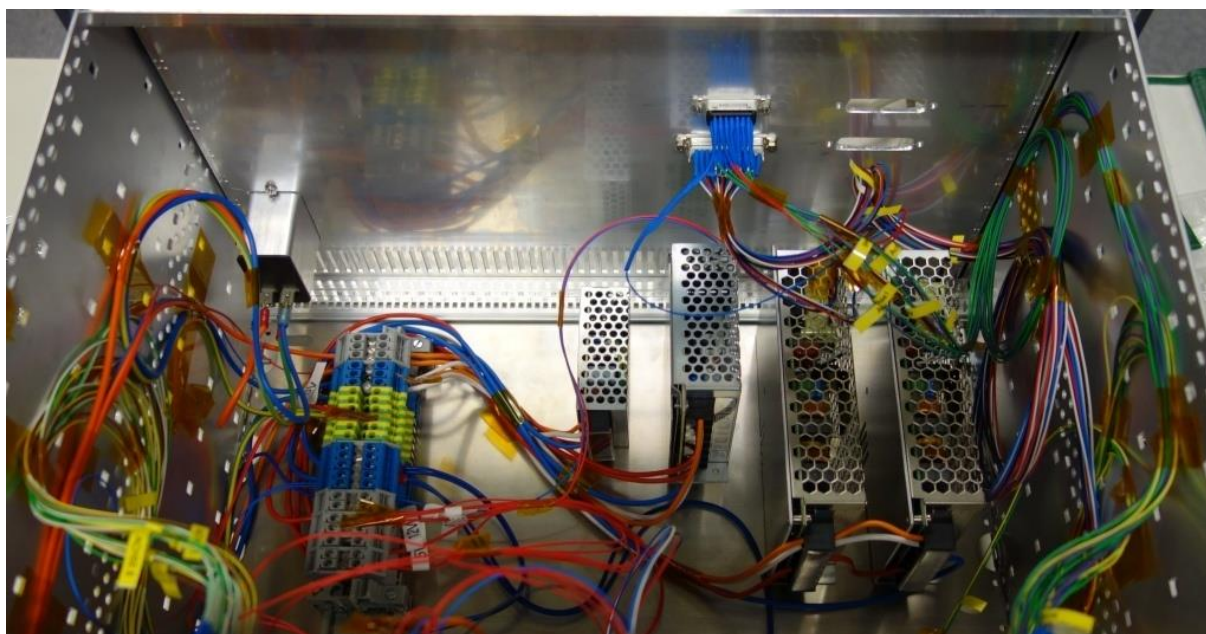


Abbildung 28: Anschlüsse auf der Rückwand von Innen betrachtet

In Abhängigkeit der Anschlüsse auf der Rückwand (siehe Abbildung 28) können die Netzgeräte auf der Aluminiumgrundplatte positioniert werden, wie in Abbildung 29 zu sehen ist. Auf der linken Seite sind zwei 35 V-Netzteile, die in Serie geschaltet werden, angeordnet und damit die 70 V Versorgung der SMCI 36 ergeben. In der Mitte ist ein Netzteil mit 24 V und 5 V Ausgangsspannung angebracht. Das kleinste Netzteil, mittig rechts, stellt 12 V zur Verfügung.

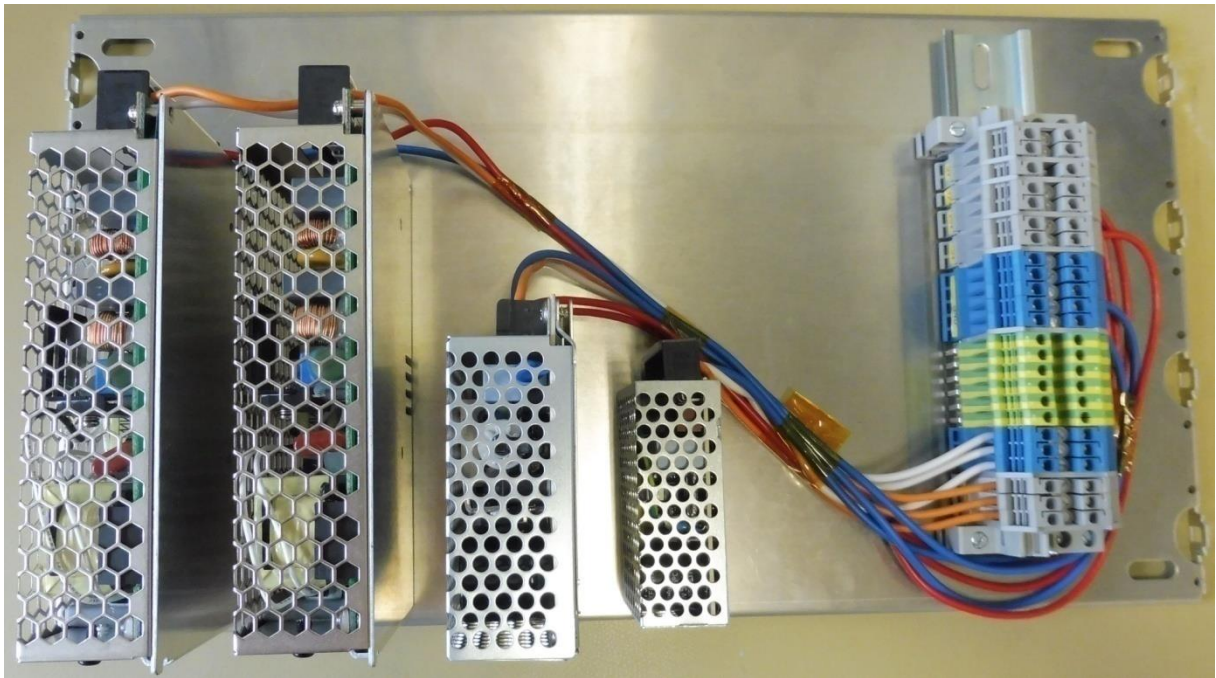


Abbildung 29: Montage der Netzgeräte und Verteilerschiene auf der Grundplatte

Am rechten Rand ist die Verteilerschiene mit den Klemmenblöcken montiert. Von unten nach oben sind folgende Spannungsniveaus vertreten:

Spannungsniveau	Farbe der Klemmblöcke	Beschreibung
230 V Phase	Grau	Netzanschluss
230 V 0-Leiter	Blau	Netzanschluss
Erdung	Grün, Gelb	Verbunden mit Gehäuse und Erd-Leiter
Ground	Blau	0-Niveau innerhalb des Gehäuses für alle Spannungsniveaus
70 V	Grau	Versorgungsspannung für SMCI 36
24 V	Grau	Schaltspannung für alle Relais
12 V	Grau	Versorgungsspannung für Mikrocontroller und Lüfter
5 V	Grau	Logikspannungsniveau

Tabelle 14: Spannungsniveaus innerhalb des EGSE

Das Gehäuse der Firma Schorf ist als modulares Baukastensystem ausgeführt. Alle Teilungsabstände und Baumaße sind auf den Einbau der Euro-Platinen ausgerichtet. Dadurch ist es möglich, dass alle sechs Steuerungen mit den Filterplatinen in einer

Ebene untergebracht werden können (siehe Abbildung 31). Das Gehäuse selbst besteht aus Aluminium-Druckguss- und Strangpressteilen. Alle Teile werden mit M4-Torx-Schrauben verbunden. Das erlaubt einen einfachen und schnellen Zusammenbau bzw. ein einfaches Nachjustieren.

Die Mutterverdrahtung im Inneren des Gehäuses wird exakt nach dem erstellten Plan ausgeführt. Wenn sich Änderungen ergeben, werden diese umgehend im Plan protokolliert, um spätere Verwechslungen zu vermeiden.

Um während der Verkabelung Fehler zu vermeiden, empfiehlt es sich, dass man sich streng an die Farbcodierung aus dem Plan zu hält. Des Weiteren sind alle Kabelgruppen mit der Nummer der jeweiligen Steuerung (Achse1 bis Achse6) beschriftet, um auch nach dem Zusammenfassen in Kabelbäume zugeordnet werden zu können. Die Beschriftungen sind in Abbildung 30 als gelbe Fähnchen an den Kabeln zu erkennen. Um die Übersichtlichkeit zu erhöhen und Beschädigungen an den Kabeln zu vermeiden, werden einzelne Kabel zu Kabelsträngen zusammengefasst und an der Gehäusewand befestigt. In Abbildung 30 ist das Gehäuse von hinten ohne Rückwand und Deckblech zu sehen. Deutlich sind die Netzgeräte und die Verteilerschiene zu erkennen. Hinter den Netzteilen auf der unteren Ebene sind die sechs Filterplatinen mit den SMCI 36-Steuerungen zu erkennen. Diese werden zum Teil durch den hinteren oberen Querträger des Gehäuses verdeckt. Im Vordergrund der Abbildung ist rechts unten der Netzanschluss zu erkennen und links unten die Leitungen für die Motoren in weiß, blau schwarz und rot, und für die Endschalter in grün und violett.

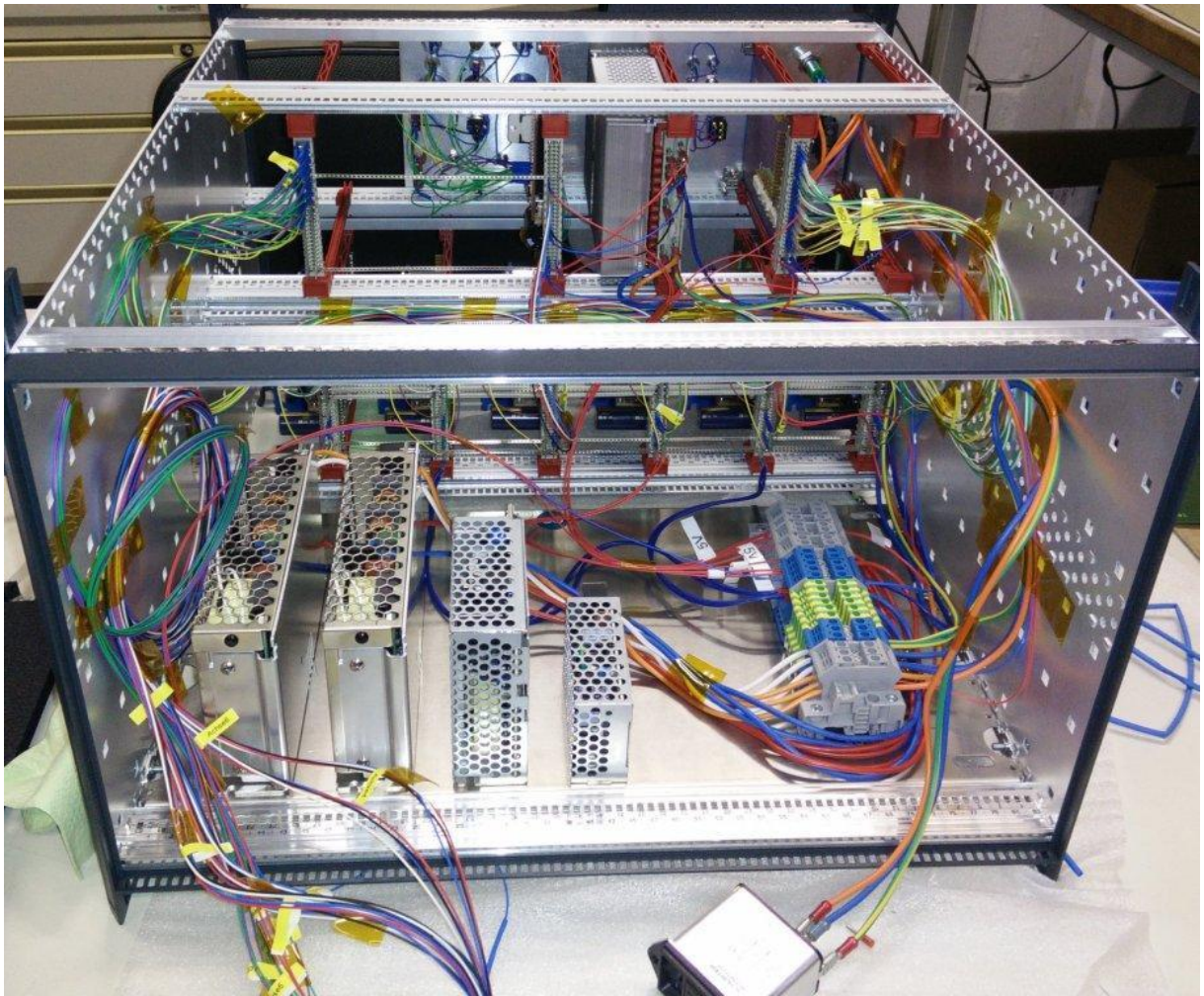


Abbildung 30: 19-Zoll-Gehäuse mit Mutterverdrahtung und mehreren Komponenten

In Abbildung 31 ist das Gehäuse in der Frontalansicht zu erkennen. In der oberen Ebene, von links beginnend, sind hier der Notaus-Knopf mit Status-LED, die Mutterschaltung mit vier roten Status-LEDs, das steuerbare Netzteil für die Starting-Current und die Starting-Current selbst zu erkennen. Oben rechts befindet sich ein in dieser Abbildung freier Steckplatz für eine Euro-Platine. Hier wird im weiteren Verlauf die Optokoppler-Karte platziert. In der unteren Ebene sind die sechs Steuerungen zu erkennen, wobei hier nur die Erste mit einem Frontpanel ausgestattet ist.



Abbildung 31: Frontansicht des z.T. fertiggestellten EGSE

4.4.3 Platine für das Mutterprogramm

Die Mutterschaltung hat die Aufgabe, die einzelnen Einschaltvorgänge zu koordinieren und zeitlich abzustimmen. Für einen Schrittmotortreiber ist es wichtig, dass, während eine Schrittsequenz ausgegeben wird, eine Last in Form eines Motors angeschlossen ist. Ist dies nicht der Fall, kann der Treiber zerstört werden [23]. Es muss also unter allen Umständen verhindert werden, dass die SMCI 36 einen Motor antreibt, ohne dass ein Motor angeschlossen ist, bzw., dass während des Betriebs der Motor von der Steuerung getrennt wird.

Das Relay-SWITCH (siehe Kapitel 4.2) hat die Aufgabe an einen Motorausgang entweder eine SMCI 36 oder die Starting-Current zu schalten. Es muss also sichergestellt werden, dass dieses Relay nur dann von der SMCI 36 auf die Starting-Current wechselt, wenn die SMCI 36 den Motor garantiert nicht antreibt. Dies kann am einfachsten dadurch erreicht werden, dass die SMCI 36 beim Schalten des SWITCH-Relais nicht in Betrieb ist, also keine Versorgungsspannung anliegt. Zu diesem Zweck wird das Relais ON/OFF eingebaut. Beide Relais werden über das Mutterprogramm gesteuert.

Es soll auch sichergestellt werden, dass die Starting-Current immer nur einen Motor antreibt. Da insgesamt sechs Achsen, die angetrieben werden können, vorhanden sind und die Bewegungen des ECHO-Mechanismus übersehbar klein sein können, muss

verhindert werden, dass aus Versehen zwei oder mehr Motore mit der Starting-Current betrieben sind.

Zu diesem Zweck werden die Schaltsignale der Schalter ON/OFF und SWITCH am Frontpanel (siehe Kapitel 4.2) von einem Mutterprogramm registriert und anschließend die Relais ON/OFF und SWITCH über dieses Programm betätigt. Das Programm setzt nur Schaltzustände, die den oben beschriebenen Bedingungen entsprechen, in Relaisbetätigungen um. Schaltzustände, die eine unzulässige Relaisbetätigung zur Folge hätten, werden ignoriert und eine Fehlermeldung wird ausgegeben.

Ursprünglich ist für die Mutterschaltung, wie im S4-EGSE, eine SPS vorgesehen. Nach den Erfahrungen, die mit einem Mikrocontroller für die Starting-Current gemacht wurden, wurde anstatt der SPS ein Mikrocontroller verwendet. Es müssen insgesamt zwölf digitale Eingänge von den sechs Schaltern ON/OFF und SWITCH und zwölf digitale Ausgänge für die Relais vorhanden sein. Des Weiteren soll das Programm über einen Ein/Aus-Schalter gestartet werden können. Es sollen vier LEDs als Statusanzeige angesteuert werden können und es soll ein RESET möglich sein. Das ergibt insgesamt 30 digitale I/Os. Außerdem soll die Möglichkeit bestehen, noch mindestens sechs digitale Inputs für unbestimmte Zwecke verarbeiten zu können, falls eine Erweiterung des EGSEs dies verlangt.

Eine SPS ist definitiv in der Lage, diese Anforderungen zu erfüllen. Da eine SPS aber viele Funktionalitäten hat, die für das EGSE nicht benötigt werden wurde aus wirtschaftlichen Gründen ein μC gewählt. Es wird ein μC vom Typ Arduino Mega mit einem Chip vom Typ Atmel ATmega 2560 eingesetzt. Dieser μC bietet, wie der Arduino UNO aus Kapitel 4.3.2, eine einfache Programmierumgebung und anders als dieser bis zu 54 digitale I/Os sowie 16 analoge Inputs und zwölf PWM Outputs. Damit kann der Controller als für die Aufgabe geeignet angesehen werden.

Der Mikrocontroller hat einen Signalspannungspegel von 5 V und kann max. 4 mA Strom aufnehmen [30]. Diese 4 mA sollten aber nur über einen kurzen Zeitraum anliegen. Ein Relay, wie es für ON/OFF verwendet wird, benötigt 15 mA bei 24 V [31]. Um den Schaltspannungspegel zwischen dem Mikrocontroller und den Relais auszugleichen und die für das Schalten benötigte Stromstärke zur Verfügung stellen zu können, werden Optokoppler eingesetzt.

Es wird eine Lochrasterplatine nach DIN 41494 eingesetzt. Die gesamte Verkabelung auf der Platine erfolgt von Hand. Es werden alle Anschlüsse des Mikrocontrollers als Pins auf der Platine verlötet. Der Mikrocontroller kann dann auf diese Pins aufgesteckt werden. Des Weiteren sind zwölf Optokoppler für die zwölf Relais verbaut. Insgesamt befinden sich auf der Platine über 180 Lötstellen mit Abständen von zum Teil unter 1 mm. Der Bau dieser Platine ist daher fehleranfällig. Dies zeigt sich auch in der Tatsache, dass die Platine nach zwei Werktagen Fertigung weiter zwei Werktage

getestet wird und Fehler ausgebessert werden müssen, bevor sie einsatztauglich ist. In Abbildung 31 oben, zweites Feld von links, ist das Frontpanel der Platine zu sehen. Es sind deutlich die vier roten LEDs, die den Zustand anzeigen, sowie die Schalter zu erkennen.

4.4.4 Starting-Current

Für die Starting-Current wird, wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben, eine eigene Lochrasterplatine zusammengestellt. In Abbildung 32 sind die Platine und das Frontpanel von hinten zu sehen. Auf der Platine ist rechts in orange der Mikrocontroller befestigt. Die orange Controller-Platine wird dabei direkt auf Pins aufgesteckt, die in der Lochplatine eingelötet sind. In der Bildmitte links neben der orangen Platine ist der L298 IC zu sehen. Links neben dem L298 befinden sich acht sogenannte Schottky-Dioden. Diese Dioden haben die Aufgabe, Spannungsspitzen, die beim Umpolen der Schrittmotorspulen entstehen, abzuleiten und auf diese Art und Weise die ICs zu schützen. Um diese Spannungsspitzen nicht ungefiltert an das Versorgungsnetz abzugeben, befindet sich unterhalb der orangen Platine, in schwarz, ein Pufferkondensator.

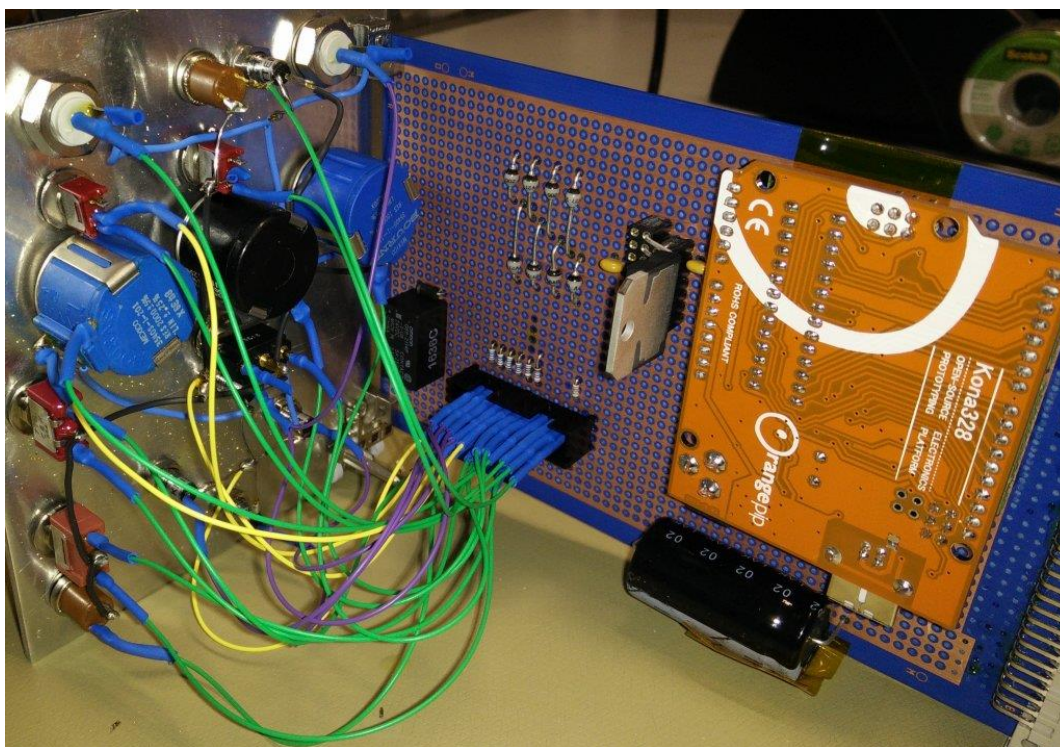


Abbildung 32: Platine mit Mikrocontroller, L 298 und Frontpanel mit Bedienelementen von hinten

Am Frontpanel, welches in Abbildung 32 von hinten zu sehen ist und in Abbildung 33 links von vorne, sind die Bedienelemente zu erkennen.



Abbildung 33: Frontpanel der Starting-Current und Lochplatte von unten

Alle Bedienelemente am Frontpanel der Starting-Current sind in Tabelle 9 aufgelistet.

In Abbildung 33 rechts ist die Lochrasterplatte mit allen Lötstellen und der Verkabelung zu erkennen. Es wurde besonderer Wert darauf gelegt, die Verbindung zwischen Mikrocontroller und L298 so kurz wie möglich zu halten, um jegliche Schwankung des Spannungspegels zu verhindern.

Bezeichnung am Frontpanel	Bauteil	Funktion
Duty-Cycle-Reduction	Potentiometer	Spannungsvorgabe für einen analogen Eingang des Mikrocontrollers
Frequenz	Potentiometer	
Voltage	Potentiometer	Spannungsvorgabe für das steuerbare Netzteil
CW/CCW	Kippschalter	Drehrichtungsänderung
ON/OFF	Kippschalter	Start des Programmablaufes am μC
V-DEWE	Kippschalter Koaxstecker	Spannungsvorgabe für das steuerbare Netzteil vom Messgerät
Single Step	Kippschalter Drucktaster	Schrittfortgang wird manuell durch Drucktaster ausgeführt
Frequenz DEWE	Koaxstecker	Frequenzmessung mit Messgerät

Tabelle 15: Elemente am Frontpanel der Starting Current

5 Test-Hexapode

Hauptziel des Test-Hexapods ist es, als Testplattform für die Steuerung zu dienen. Der fertige ECHO-Mechanismus ist sehr teuer und sensibel. Außerdem sind die Bewegungen, die der Mechanismus ausführen wird, im 1/10 mm-Bereich. D.h., dass eine Fehlbedienung mit freiem Auge mitunter gar nicht erkannt werden und trotzdem bereits zu einer Beschädigung führen kann. Um Fehlbedienungen durch eine falsche Programmierung, einen Fehler in der Steuerung oder Annahme falscher Tatsachen zu vermeiden, sollen daher alle Abläufe zuerst auf dem Test-Hexapode durchgeführt werden können. In erster Linie die Funktionsfähigkeit der Steuerung als Abschluss dieser Arbeit demonstriert werden.

Da jedes einzelne Kugelgelenk eine dreidimensionale Ausdehnung hat, muss von der in Kapitel 2.1.1 beschriebenen Form gleichseitiger Dreiecke abgewichen werden. In Abbildung 34 ist die reale Verteilung der Gelenkpunkte am Endeffektor und auf der Grundplatte in der Draufsicht dargestellt.

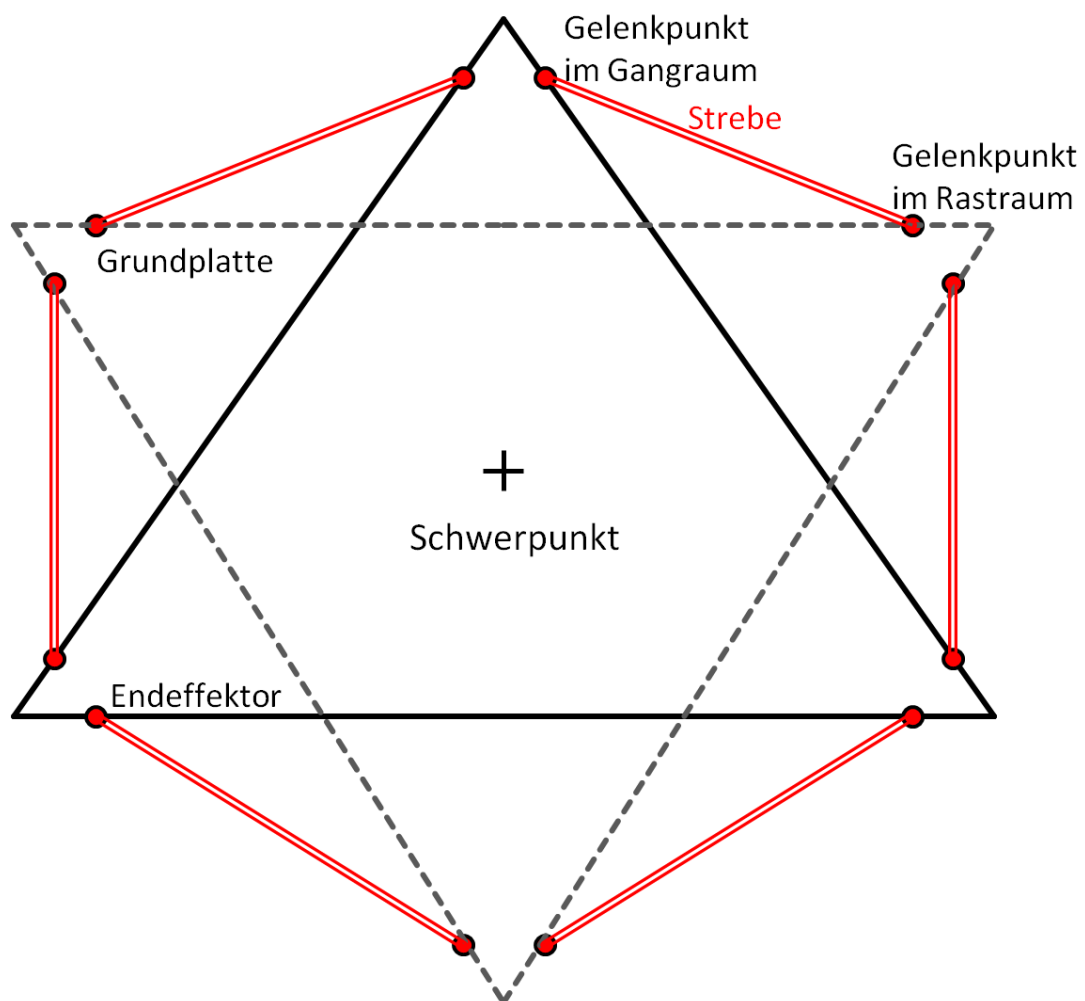


Abbildung 34: Schema der Gelenkpunkte am Endeffektor und der Grundplatte im Grundriss

Der Abstand zwischen zwei Kugelgelenken ist von deren Abmaßen und dem nötigen Bewegungsspielraum abhängig.

Weitere Anforderungen an den Testhexapod sind:

- einfacher Aufbau
- einfache Fertigung
- schnelle Betriebsbereitschaft
- günstige Beschaffung
- einfach zu adaptieren

Der Testhexapod stellt lediglich ein Hilfsmittel dar. Daher soll der Anschaffungspreis möglichst niedrig sein. Um das zu erreichen, wurden viele Komponenten im Haus vom Verfasser dieser Arbeit selbst gefertigt. Es ist notwendig, die einzelnen Teile so zu gestalten, dass sie auf den zur Verfügung stehenden Werkzeugmaschinen gefertigt werden können. Diese sind im Folgenden aufgezählt.

- Drehbank
- Fräsmaschine
- Blechschere
- Blechbiegemaschine (Aluminium bis 4 mm)
- Bandsäge
- Bandschleifmaschine
- Säulenbohrmaschine

Es werden folgende Zukaufteile für den Mechanismus verwendet:

- Igubal®-Kugelgelenkköpfe
- Mikroschalter als Endschalter
- Linearaktuatoren von Nanotec [32]

Der Endeffektor wie auch die Grundplatte wurden aus 4 mm-Aluminium-Blech ausgeführt. Um die Steifigkeit zu erhöhen, wurden die Bleche, wie in Abbildung 40 zu sehen ist, an den Kanten gefalzt. Die Befestigung der Gelenke am Endeffektor und an der Grundplatte erfolgt mit jeweils einer Schraube. Durch neu zu bohrende Durchgangslöcher für die zwölf Gelenke könnte die Geometrie des gesamten Hexapoden einfach geändert werden.

5.1 Fertigung der Achsen

Die sechs Achsen sind baugleich. Als Fixpunkte für die Konstruktion wurden der Linearantrieb von Nanotec sowie die Igubal®-Kugelgelenkköpfe verwendet. Die Achse ist gewissermaßen „um diese Komponenten herum“ konstruiert. In Abbildung 35 ist das Führungsrohr (1), die Führungsmuffe (2), die Schubstange (3), das obere

Kugelgelenk (4) und der Linearaktuator (5) in einem frühen Stadium der Fertigung zu sehen.

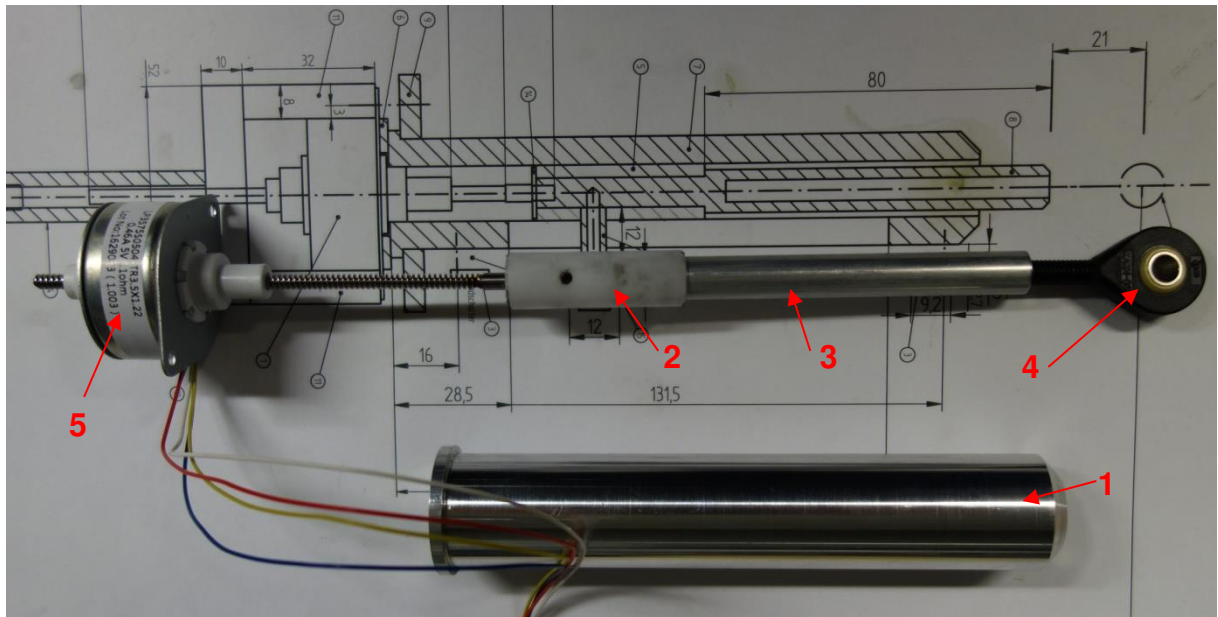


Abbildung 35: Erste Teile einer Achse

Der Linearaktuator besteht, wie in Abbildung 35 dargestellt, aus einem Schrittmotor mit einer hohlen Motorwelle. Die Hohlwelle besitzt ein Innengewinde. Durch dieses Innengewinde wird eine Gewindespindel angetrieben. Dreht sich der Motor, führt die Gewindespindel unter der Voraussetzung, dass sie gegen Verdrehen gesichert ist, eine translatorische Bewegung aus.

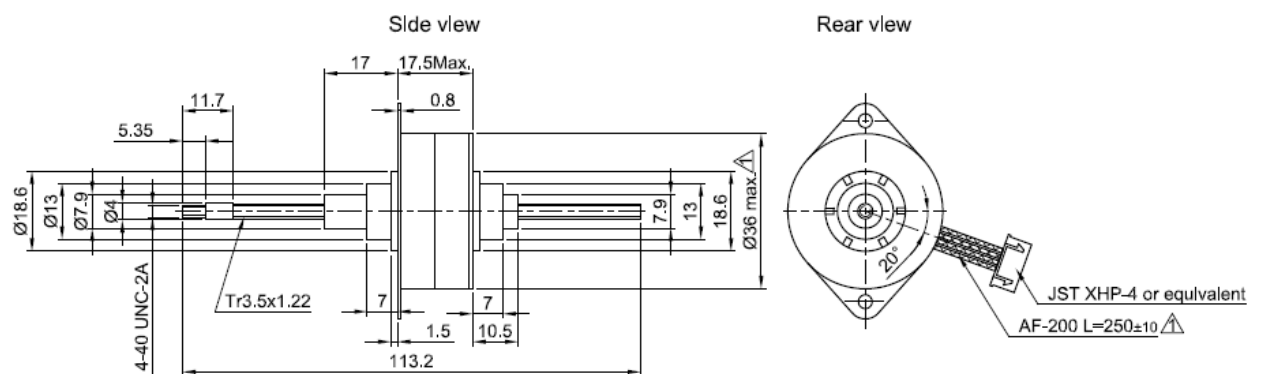


Abbildung 36 :Linearaktuator der Firma Nanotec vom Typ LP3575S0504-TR3.5X1.22 [32]

Die einzelnen Komponenten der Achse sind aus Aluminium gefertigt. Nur die Führungsmuffe und die Gleitmuffe der Verdrehsicherung sind aus Cellamit 900 gefertigt.

Der kritischste Teil in der Fertigung ist das Führungsrohr. Zum einen muss die Gleitmuffe passgenau und möglichst widerstandsarm darin gleiten, zum anderen wird durch eine Längsnut die Verdrehsicherung gewährleistet. Ein zu großes Spiel

Die Mikroschalter fungieren als Unterbrecher und werden mit 5 V beaufschlagt. Die Schalter sind auf einer Antigleitunterlage (siehe Abbildung 37, roter Rahmen) gebettet und mit einem Gewebekband befestigt. Das führt zu einem sehr flexiblen Sitz der Endschalter. Dadurch wird die Genauigkeit in der Positionierung beeinträchtigt, aber im Falle einer Kollision durch falsche Bedienung werden weder die Schalter, noch deren Aufhängung beschädigt. Diese Sicherheitsmaßnahme hat sich vor allem bei den ersten Praxistests als sehr nützlich erwiesen.

Die Länge der Arme kann durch Verdrehen der Kugelgelenkköpfe und durch Adjustieren der Endschalter beeinflusst werden. Um den Anwender zu schützen, müssen alle elektrisch leitfähigen Teile der Konstruktion mit dem Erd-Leiter verbunden sein. Da die Kugelgelenkköpfe wie auch die Führungsmuffen aus Kunststoff sind, ist es notwendig, diese Teile durch Kabel kurzzuschließen.

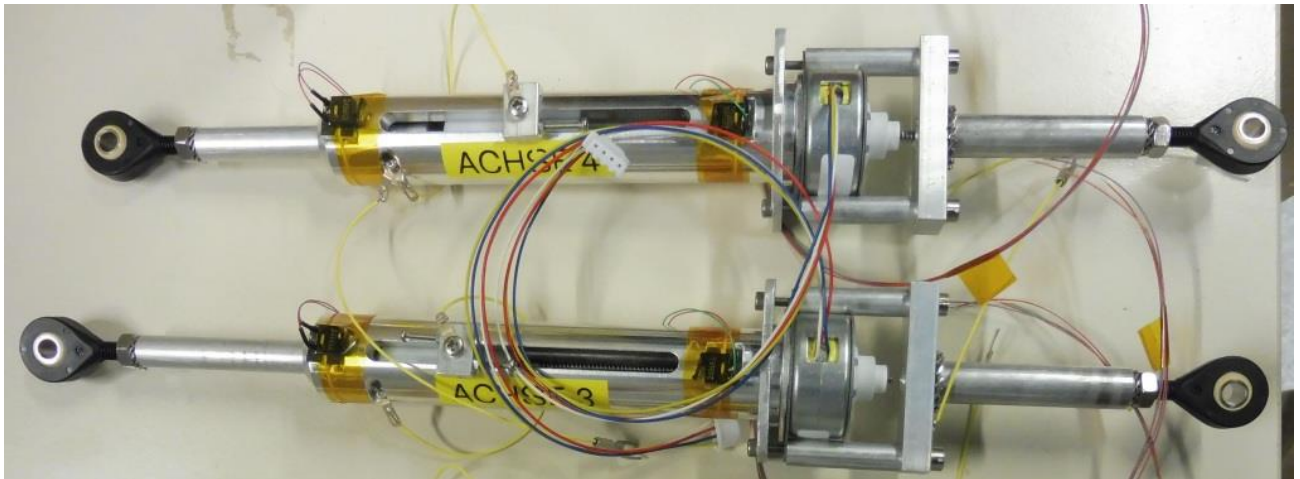


Abbildung 38 : Fertig montierte Achsen 3 und 4

Nach dem Zusammenbau jeder einzelnen Achse wurden diese mit einem Labornetzgerät und einer SMCI 36-Steuerung auf Funktion getestet. Des Weiteren wurden alle Achsen so genau wie möglich auf dieselbe Länge eingestellt.

5.3 Gesamter Aufbau

Die Igubal®-Kugelgelenkköpfe haben laut Hersteller einen Bewegungsspielraum von $\pm 14,5^\circ$ um zwei Achsen und können um die dritte Achse beliebig bewegt werden. Dieser Spielraum ist im Normalbetrieb nahezu vollkommen ausgeschöpft. Um Reserven einbauen zu können und nicht durch die Gelenkköpfe limitiert zu sein, wurden spezielle Aufhängungen der Köpfe hergestellt. In Abbildung 39 sind diese Aufhängungen zu sehen. Die Bewegungsfreiheit wird dadurch begrenzt, dass der schwarze Außenteil des Gelenks, der sich auf der weißen Kugel dreht, mit der Befestigung der Kugel kollidiert. In der Bohrung der Kugel befindet sich eine Metallhülse. Auf dieser Metallhülse sitzt stirnseitig auf der einen Seite eine M6-Zylinderkopfschraube und auf der anderen Seite, als Widerlager, eine Metallhülse mit

8 mm Durchmesser. Der stirnseitige Sitz wird durch einen Kegelsitz ersetzt und auf diese Weise die jeweiligen Außendurchmesser des Widerlagers und der Schraube reduziert. Somit konnten die Schwenkwinkel erheblich erhöht werden.

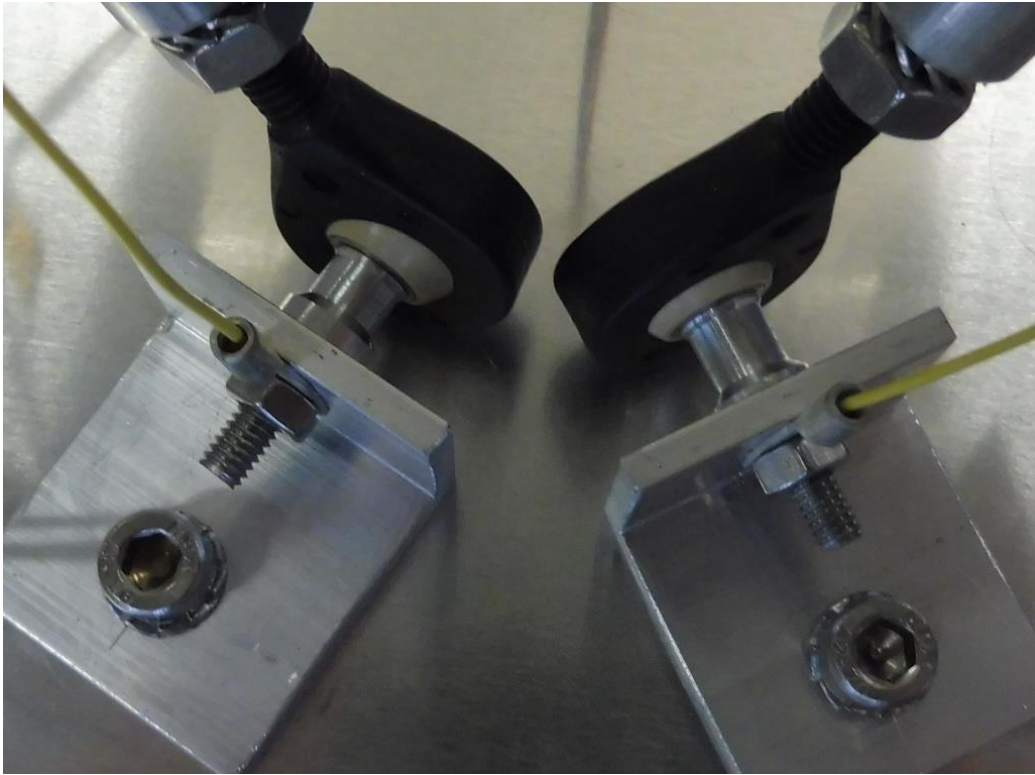


Abbildung 39 : Bewegungsspielraumerweiternde Befestigung der Gelenkköpfe

Auf Abbildung 40 sind die oberen Gelenkpunkte zu erkennen. Wie auf Seite 61 beschrieben, erfolgen die Befestigungen am Effektor nur über die beiden Schrauben. Gut zu erkennen sind hier auch die gelben Erdungskabel.

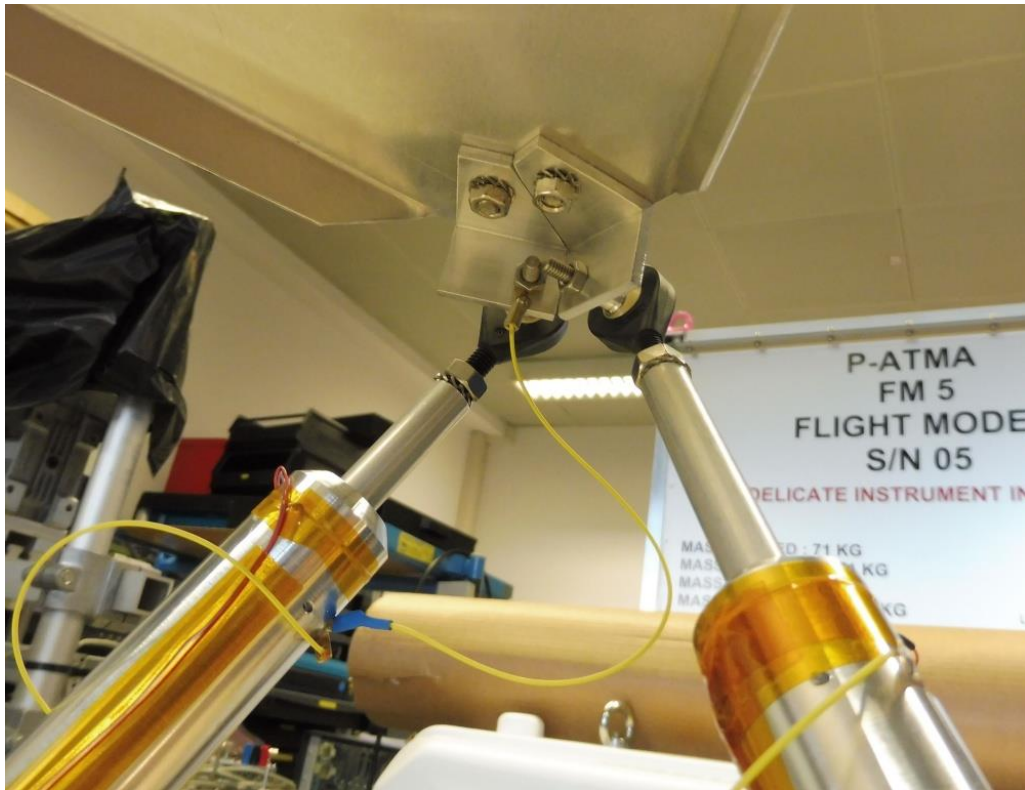


Abbildung 40: Oberer Gelenkpunkt des Test-Hexapods

Durch die Verwendung der Kugelgelenkköpfe ergeben sich pro Gelenk drei Freiheitsgrade (siehe Kapitel 2.1.1.). Dadurch ergeben sich pro Strebe insgesamt sieben Freiheitsgrade, statt der nötigen sechs. Das führt dazu, dass sich die einzelnen Streben um ihre Längsachse in geringem Ausmaß drehen können. Im Betrieb hat das für diesen Hexapoden keine Auswirkung, da die bewegten Massen wie auch die Geschwindigkeiten (max. 15 mm/s) gering sind. Für den Zusammenbau bedeutet dieser zusätzliche Freiheitsgrad eine erhebliche Erleichterung.

6 Funktionsstest

Den eigentlichen Funktionstests gehen umfassende Messungen voraus. Vor dem eigentlichen Einbau werden, wie weiter oben beschrieben, alle Baugruppen einzeln auf Funktion geprüft. In Tabelle 16 sind die Tests dargestellt, denen alle Komponenten nach der Fertigstellung unterzogen wurden. Das umfasst alle Platinen sowie die Mutterverdrahtung.

Test	Beschreibung
Durchgangsprüfung	Mit einem Widerstandsmessgerät werden alle elektrischen Verbindungen auf elektrische Leitfähigkeit überprüft.
Prüfung auf richtigen Anschluss	Mit einem Widerstandsmessgerät wird überprüft, ob benachbarte Pins unbeabsichtigt verbunden sind.

Tabelle 16: Standardtests zur Qualitätssicherung

Durch diese einfache Überprüfung mittels Widerstandsmessgerät können Fehler bereits frühzeitig erkannt werden.

Vor dem Einbau der einzelnen Komponenten wird die Mutterverdrahtung separat überprüft. In Tabelle 17 sind die einzelnen Schritte der Überprüfung aufgezählt.

Test	Beschreibung
Ground Durchgangsprüfung	Mit einem Widerstandsmessgerät werden alle elektrischen Verbindungen auf Leitfähigkeit geprüft. Jedes Spannungsniveau wird dabei separat überprüft.
5 V DC Durchgangsprüfung	
12 V DC Durchgangsprüfung	
24 V DC Durchgangsprüfung	
70 V DC Durchgangsprüfung	
230 V AC Durchgangsprüfung	
Erdung Durchgangsprüfung	Bei der Erdung wird die einwandfreie elektrische Verbindung zu allen Gehäuseteilen überprüft.
Prüfung auf richtigen Anschluss	Hiermit wird sichergestellt, dass alle Spannungsniveaus vollständig voneinander getrennt sind.

Tabelle 17: Überprüfung der Mutterverdrahtung

Nach dem Einbau der einzelnen Baugruppen in das Gehäuse und damit der Verbindung aller Einzelkomponenten zu einem Gesamtsystem wird die einwandfreie Funktion der Interfaces überprüft (siehe Tabelle 18).

Test	Beschreibung
Durchgangsprüfung der Motoranschlüsse	Zu diesem Zweck werden die Motoranschlüsse am Frontpanel jeder einzelnen Steuerung mit den Pins des D-SUB-Steckers auf der Rückseite des Gehäuses mit dem Widerstandmessgerät auf Durchgang geprüft
Prüfung auf richtigen Anschluss der Motoranschlüsse	Es werden die Frontpanels zusammen mit dem D-Sub-Stecker auf der Rückseite überprüft
Durchgangsprüfung der Endschalter zur SMCI 36	Für diesen Test wird immer nur eine Platine mit SMCI 36 eingebaut und mit dem D-Sub-Stecker auf der Rückseite gegengeprüft, da sonst die Messstelle auf der Oberseite der SMCI 36 nicht zugänglich ist

Tabelle 18: Messung der Komponenten im Verbund

Um Fehlerquellen ausschließen zu können, wird vorerst immer nur ein Spannungsniveau in Betrieb genommen. Zu diesem Zweck wird folgendermaßen vorgegangen (siehe Tabelle 19).

Vorgang	Zweck
Alle Netzgeräte bis auf das für den Stromkreis zuständige, werden vom Netz getrennt	Es wird nur dieser eine Stromkreis überprüft.
Die Spannungsversorgung wird eingeschaltet.	
Spannungsmessung am Gehäuse	Um sicherzustellen, dass keine Verbindung zum Gehäuse besteht.
Strommessung im Erdungsleiter	Um sicher zu stellen, dass keine Verbindung zur Erde besteht.

Tabelle 19: Überprüfung der einzelnen Stromkreise

Im Anschluss an das separate Überprüfen der einzelnen Stromkreise werden schrittweise alle Spannungsniveaus eingeschaltet. Alle SMCI 36 werden über die RJ485-Schnittstelle mit einem PC verbunden und der Testhexapode wird angeschlossen. Es werden folgende Tests durchgeführt (siehe Tabelle 20).

Vorgang/Test	Beschreibung
Konfiguration der Steuerung	Vor den Tests müssen die für den Betrieb kritischen Parameter der Steuerung konfiguriert werden.
Endschalter	Es wird überprüft, ob die Software die jeweiligen Endschalter erkennt und auf eine Betätigung reagiert.
Fahrt	Es wird überprüft, ob ein Verfahren der einzelnen Achsen möglich ist.

Tabelle 20: Überprüfung der SMCI 36 und der Kommunikation

Nach Abschluss dieser Tests ist sichergestellt, dass eine Kommunikation mit allen sechs Nanotec-Steuerungen über die serielle Schnittstelle möglich ist. Damit ist es möglich, alle Achsen zu referenzieren sowie eine Einzelpositionierung jeder Achse vorzunehmen. Ein gleichzeitiges Ansprechen aller sechs Achsen ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht möglich.

Insgesamt kann das EGSE damit von der elektrischen/elektronischen Seite her vollständig in Betrieb genommen werden. Es ist möglich, sechs Schrittmotore anzusteuern, Starting-Current-Tests für jeden einzelnen Schrittmotor durchzuführen, und. Im Betrieb ist Sicherheit für den Anwender gewährleistet. Es ist noch nicht möglich, mit dem Hexapoden eine koordinierte Bewegung auszuführen. Darauf wird in Kapitel 7 genauer eingegangen.

7 Steuerung über ein Programm

Die Programmierung entstand in Zusammenarbeit mit den Informatikstudenten Ing. Thomas Rauhofer und Tobias Watzek.

Ziel ist es, das Programm im späteren Einsatz auf einem Raspberry PI 3 ablaufen zu lassen. Ein Raspberry PI (PI) ist ein Mini-PC. Inklusive Gehäuse und aller Anschlüsse betragen die Maße L x B x H: 93 mm x 62 mm x 31 mm (siehe Abbildung 41: Raspberry PI 3). Der PI stellt eine Prozessorleistung von 4x 1,2 GHz zur Verfügung und ist WLAN-fähig. Außerdem sind eine Reihe von digitalen I/Os mit 5V Signalpegel vorhanden. Der PI wurde gewählt, um die Gesamtsteuerung vollständig in das Gehäuse des EGSE integrieren zu können. Auf dem späteren Testplatz werden das EGSE, ein oder mehrere Messgeräte und ein Mess-PC vorhanden sein. Um zu verhindern, dass ein weiterer PC in Form z.B. eines Notebooks für die Gesamtsteuerung notwendig ist, soll diese Funktion vom PI übernommen werden. Erfahrungen aus der Vergangenheit haben gezeigt, dass der Mess-PC aus Platzmangel oftmals auch als Steuerungs-PC verwendet wird. Das führt häufig zu einer Überbelastung des PC und damit zu einem Systemabsturz, bzw. zum Versagen während des Messvorganges. Daher sollen die Aufgaben des Messens und der Gesamtsteuerung von zwei unabhängigen PCs ausgeführt werden.



Abbildung 41: Raspberry PI 3 [33]

Da der PI LINUX basiert ist, müssen alle Funktionen des Programms mit diesem Betriebssystem kompatibel sein. Das Programm selbst wird mit der Programmiersprache GO geschrieben. In Tabelle 21 sind alle Klassen dieses Programms aufgelistet.

Klasse	Funktion
Eingabe	Eingabe von Steuerbefehlen
Control	Kontrolle des gesamten Ablaufes, Initialisierung aller anderen Klassen
Strebe	Statusspeicher der einzelnen Streben
Calculator	Berechnung laut Kapitel 2.1.1
Translator	Übersetzung in Maschinencode
Serial	Kommunikation mit dem RS 485 Serial-Com-Port

Tabelle 21: Klassen im Steuerprogramm

Die Hauptkomponente stellt die Klasse Control dar. Von dieser werden alle weiteren Klassen aufgerufen und es erfolgt die gesamte Steuerung des Programms. In Abbildung 42 ist die Struktur des Programms dargestellt.

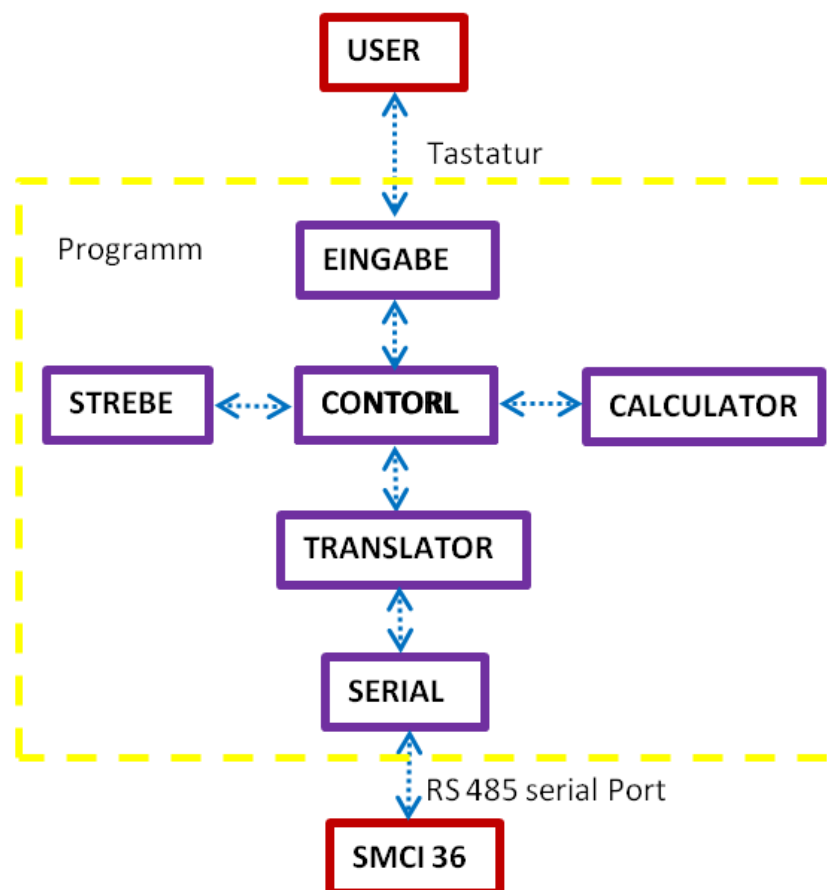


Abbildung 42: Programmstruktur des ECHO-EGSE

Der Programmablauf für die Referenzierung des gesamten Mechanismus ist in Tabelle 22 aufgelistet.

Vorgang	Erklärung
User gibt über Tastatur in Eingabe den Befehl Referenzieren ein	Eingabe ist das Interface, über welches der User Befehle an das Programm erteilen kann.
Control erstellt sechs Mal die Klasse Strebe	Beim Start des Programms werden die Klassen Strebe erstellt, in ihnen wird die momentane Position der jeweiligen Strebe sowie die Koordinaten der Gelenkpunkte gespeichert
Control gibt Befehl an Translator weiter	Der Translator übersetzt den Befehl zur Referenzfahrt in für die SMCI 36 verständlichen Maschinencode. Es wird ein String mit mehrere Befehlen, z.B. Drehrichtung, Frequenz, Modus,..., ausgegeben
Übergabe an Serial	Der String wird an die Klasse Serial übergeben, diese Klasse übernimmt das Einlesen und Ausgeben von Befehlen nach dem Protokoll des Serial-Com-Port.
Antwort der SMCI 36	Die Antwort der SMCI 36 wird im Translator überprüft und anschließend an Control zurückgegeben. Über die Klasse Eingabe wird dann eine Bestätigung oder eine Fehlermeldung an den User weiter gegeben. Außerdem wird in jeder Klasse Strebe die Position mit Null gespeichert

Tabelle 22: Programmablauf für Referenzfahrt

Referenziert wird, indem alle Achsen auf den unteren Referenzschalter auffahren. Zu diesem Zweck stellt die Software der SMCI 36 den Befehl „Externe Referenzfahrt“ zur Verfügung [29]. Die Steuerung antwortet, indem der Befehl genau über den Serial Port zurückgeschickt wird. Ist die Referenzfahrt abgeschlossen, gibt die Steuerung den Status „Bereit“ zurück.

Um eine bestimmte Position anzufahren, werden die Längen der einzelnen Achsen in der Klasse Calculator berechnet. Die Längen werden an „Control“ übergeben und überprüft, ob diese innerhalb der Bewegungsgrenzen liegen. Jede Achse darf maximal 70 mm ausgefahren werden und die Position null nicht unterschreiten. Ist eine der Längen unzulässig, wird eine Fehlermeldung ausgegeben. Sind alle Längen zulässig, werden im Calculator die nötigen Geschwindigkeiten für jede Achse berechnet, damit alle Achsen die Bewegung gleichzeitig beenden.

Im Translator wird diese Information bestehend aus der neuen Position und der Frequenz in den Befehlsstring übersetzt. Alle Berechnungen im Programm finden in

den Einheiten mm und mm/s statt. Im Translator müssen diese Werte in Schritte und in Hz übersetzt werden. Für diesen Betrieb stellt die SMCI 36 die Betriebsart „Absolut-Positionier-Modus“ zur Verfügung [34].

Durch ein File, welches alle Koordinaten enthält, die den Hexapode charakterisieren, wird die dem Calculator zugrundeliegende Geometrie des Hexapoden definiert. D.h., dass nur Daten in diesem File geändert werden müssen, sollte die Geometrie des Hexapoden geändert werden.

Die Programmierung wurde so aufgebaut, dass der Programmblock Calculator beliebig austauschbar bzw. erweiterbar ist, um die Anforderungen, die der ECHO-Mechanismus an die Programmierung stellt, zu erfüllen. Der EHCO-Mechanismus stellt an die Mathematik durch seine Festkörpergelenke weit höhere Anforderungen als der Testhexapode. Das Gleichungssystem für seine Positionierung kann nach derzeitigem Stand nicht analytisch gelöst werden.

8 Resümee

Es wurde auf Basis der bisher in der Abteilung AIV, gebauten EGSEs ein neues System für den ECHO-Mechanismus entwickelt. Dabei wurde zum ersten Mal ein EGSE gebaut, welches sechs Schrittmotore gleichzeitig ansteuern kann.

Es konnten des Weiteren einige Entwicklungen aufgegriffen und verbessert werden, um den Betrieb zu optimieren und den Bau des EGSE kosteneffizienter zu gestalten.

Im Endergebnis erfüllt das gebaute EGSE die Anforderungen, die in der Spezifikation definiert wurden. Durch die Abschlusstests mit dem Testhexapoden konnte gezeigt werden, dass alle Betriebsarten durchführbar sind. Es ist möglich, den Testhexapoden über die Eingabe von fünf Lagekoordinaten in eine gewünschte Position zu bewegen. Eingaben, die aus kinematischer Sicht nicht möglich sind, werden nicht ausgeführt und mit einer Fehlermeldung quittiert. Durch die Verwendung des Raspberry Pi kann die Eingabe über jedes beliebige W-LAN-fähige Gerät erfolgen, ohne dessen Kapazitäten während der Ausführung zu beanspruchen. Damit ist es bedenkenlos möglich, den am Messplatz vorhandenen Mess-PC für die Eingabe zu nutzen.

Durch die Verwendung des μC konnte die Flexibilität der Starting-Current stark erhöht, sowie der Wave-Betrieb mit Duty-Cycle-Reduction realisiert werden. Der μC birgt außerdem weiteres Entwicklungspotential durch die Verwendung von PWM (Puls-Weiten-Modulation)-Ausgängen. Durch die Verwendung eines μC für die Mutterschaltung konnte auf eine kostenintensive SPS verzichtet und Bauraum im Inneren des Gehäuses eingespart werden. Bei kleineren Steuerungen könnte vermutlich auch der Raspberry PI als Mutterschaltung eingesetzt werden, da dieser ebenfalls über 36 binäre I/O-Pins verfügt.

Für die NanotecSteuerung konnte eine einheitliche Filterplatine erstellt werden, die nach jetzigem Wissenstand alle Eventualitäten, die der Betrieb der SMCI 36 mit sich bringt, auch in zukünftigen Projekten abdeckt.

9 Zukünftiger Ausblick

In diesem Kapitel soll darauf eingegangen werden, wie mit dem EGSE nach Abschluss dieser Arbeit weiter verfahren wird und was für Arbeiten noch zu leisten sind. Das EGSE stellt kein isoliertes System dar und muss für den späteren Betrieb noch mit anderen Systemen abgestimmt werden.

Die größten Auswirkungen auf den späteren Betrieb wird die Auswahl eines geeigneten Messsystems haben. Bei RUAG Space Austria werden derzeit mehrere Systeme vom Unternehmen Dewetron verwendet. Diese Systeme stellen abgeschlossene Lösungen dar, die direkt eingesetzt werden können. Es ist allerdings kein Gerät im Haus, welches die benötigte Kanalanzahl zur Verfügung stellt. Ein solches System müsste erst angeschafft werden.

Als Alternative zu Geräten der Firma Dewetron stehen Systeme der Firma National Instruments zur Verfügung. Mit diesen Geräten wurden im Haus bisher nur wenige Erfahrungen gemacht.

Nach der Auswahl eines entsprechenden Messsystems muss das Interface zwischen EGSE und Messgerät im Detail ausgestaltet werden. Es besteht die Möglichkeit, das EGSE selbst zu erweitern und anzupassen, um eine möglichst einfache Verbindung zum zukünftigen Messsystem herzustellen.

Letztendlich muss das EGSE zusammen mit dem Messgerät in einen funktionsfähigen Messaufbau integriert werden, der es dem Bediener ermöglicht, die notwendigen Messaufgaben durchzuführen.

Jedes bis jetzt in der AIV gebaute EGSE stellt einen Prototyp dar. Die EGSEs werden ihrerseits wiederum dafür genutzt, die Mechanismen, die aufgrund ihrer geringen Stückzahl ebenfalls Prototypen sind, zu bedienen. Daraus ergeben sich zwangsläufig Optimierungsmöglichkeiten, die erst nach dem Einsatz eines derartigen EGSEs ersichtlich werden. Das in dieser Arbeit behandelte EGSE wurde bis zum Erscheinen der Arbeit noch nicht mit dem ECHO-Mechanismus in Verbindung betrieben. Daher lassen sich dazu noch keine eindeutigen Aussagen machen.

Es wäre möglich gewesen, das gesamte System über die Phytronsteuerung und Komponenten von NI zu realisieren. Im Moment sind mehrere Systeme, die alle einer unterschiedlichen Programmierung bedürfen, im EGSE integriert. Die Änderung der Programmierung einer Komponente kann zur Folge haben, dass an anderer Stelle ebenfalls korrigierend eingegriffen werden muss. Es wäre durchaus wünschenswert, die gesamte Programmierung in einem System, z.B. Lab View, durchzuführen. Das würde auch zu einer Steigerung der Modularität führen.

Des Weiteren wäre es wünschenswert, die Tests zur Ermittlung des Losbrechstroms nicht mit einer eigenen Einheit, der Starting-Current, sondern direkt mit den bereits verwendeten Steuerungen durchzuführen. Dies würde den Bauaufwand reduzieren und die Bedienung erleichtern. Bis jetzt gibt es aber innerhalb des Unternehmens noch keine zufriedenstellende Lösung, die die Starting-Current ersetzen könnte.

Alle diese Optimierungsmöglichkeiten sind kosten- und zeitintensiv. Daher stellt sich die Frage, wie sinnvoll es ist, ein funktionierendes und etabliertes System, welches in diesem Fall aus den Nanotec-Steuerungen in Verbindung mit der Starting-Current sowie den Dewetron-Messgeräten besteht und alle Bedürfnisse abdeckt, durch ein Neues zu ersetzen.

10 Literaturverzeichnis

- [1] J. Leopold, „Chancen für die HSC-Bearbeitung durch Parallelkinematiken,“ in *Werkzeuge für Hochgeschwindigkeitsbearbeitung*, Wien, Carl Hans Verlag München Wien, 1999, pp. 261-285.
- [2] Patrick M. Koch, et all „The AMiBA Hexapode Telescope Mount,“ *The Astrophysical Journal*, Nr. 694, pp. 1670-1684, 03 2009.
- [3] Welf-Guntram Drossel, et all „Kinematik,“ in *Parallelkinematische Maschinen Entwurf, Konstruktion, Anwendung*, R. Neugebauer, Hrsg., Chemnitz, Springer Verlag, 2005, p. 35 ff.
- [4] F. Bleicher, *Parallell kinematische Werkzeugmaschinen*, Wien: Neuer Wissenschaftlicher Verlag, 2001.
- [5] S. Christensen, 12 01 2014. [Online]. Available: http://vbn.aau.dk/ws/files/181568921/Design_of_a_Stewart_Gough_Plattform_as_a_Test_Setup.pdf. [Zugriff am 02 12 2017].
- [6] C. B. Manfred Weck, *Werkzeugmaschinen Maschinenarten und Anwendungsbereiche*, 6 Hrsg., Aachen: Springer Verlag, 2005.
- [7] Welf-Guntram Drossel, et all „Struktursystematik,“ in *Parallelkinematische Maschinen Entwurf, Konstruktion, Anwendung*, R. Neugebauer, Hrsg., Chemnitz, Springer Verlag, 2005, p. 13 ff.
- [8] Welf-Guntram Drossel, et all *Parallellkinematische Maschinen*, R. Neugebauer, Hrsg., Chemnitz: Springer Verlag, 2005.
- [9] 02 2017. [Online]. Available: http://79.170.44.112/britishaviationtoursandexperiences.co.uk/?page_id=162.
- [10] Physik Instrumente GmbH & Ko, KG, 02 2017. [Online]. Available: <https://www.physikinstrumente.de/de/produkte/hexapoden-parallelkinematiken/hexapoden-mit-motor-spindel-antrieb/h-811s11-6-achsen-motion-Hexapode-700888/>.

- [11] ABB, 03 2017. [Online]. Available:
<http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-360>.
- [12] 03 1999. [Online]. Available: <https://idw-online.de/de/news10037>.
- [13] Werkzeugmaschinenentwicklung, 01 2013. [Online]. Available:
<https://forschungsinfo.tu-dresden.de//detail/forschungsprojekt/12747>.
- [14] E. Rummich, *Elektrische Schrittmotoren und -antriebe*, Renningen: expert verlag, 2015.
- [15] E. Rummich, „Grundlagen der Schrittantriebe,“ in *Elektrische Schrittmotoren und -antriebe*, Wien, expert verlag, 2015, pp. 1-37.
- [16] F. Traeger, „Permanentmagnetisch erregte Schrittmotoren,“ in *Elektrische Schrittmotoren und -antriebe*, Wien, expert verlag, 2015, pp. 68-98.
- [17] STMicroelectronics, „Home - STMicroelectronics,“ [Online]. Available:
http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/0a/84/39/6c/ae/9a/42/0a/CD00003803.pdf/files/CD00003803.pdf/jcr:content/translations/en.CD00003803.pdf. [Zugriff am 17 02 2017].
- [18] STMicroelectronics, „Home - STMicroelectronics,“ 02 2017. [Online]. Available:
<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/82/cc/3f/39/0a/29/4d/f0/CD00000240.pdf/files/CD00000240.pdf/jcr:content/translations/en.CD00000240.pdf>. [Zugriff am 17 02 2017].
- [19] R. Gfrörer, „Leistungselektronik und Signalverarbeitung,“ in *Elektrische Schrittmotoren und -antriebe*, Wien, expert verlag, 2015, pp. 138-178.
- [20] A. Binder, „Schrittmotor Antriebe,“ in *Elektrische Maschinen und Antriebe*, Darmstadt, Springer Verlag, 2012, p. 806 ff.
- [21] E. Rummich, „Untersuchung der Bewegungsvorgänge von Schrittantrieben in der Phasenebene,“ in *Elektrische Schrittmotoren und -antriebe*, Wien, expert verlag, 2015, pp. 180-179.
- [22] M. Meisner, *Stepper motor development for space applications via finite element simulation*, Wien, Wien, 2012.
- [23] NANOTEC ELECTRONIC GmbH & Co. KG, „Nanotec Plug & Drive,“ [Online]. Available:

- http://de.nanotec.com/fileadmin/files/Handbuecher/Motorcontrols/SMCI3_6_Technisches_Handbuch_V1-3_de.pdf. [Zugriff am 11 10 2016].
- [24] R. Fischer, Elektrotechnik für Maschinenbauer, 15 Hrsg., Esslingen: Springer Vieweg, 2016.
- [25] F. Zach, „Ansteuerungsschaltung für MGDs,“ in *Leistungselektronik*, 5 Hrsg., Wien, Springer Vieweg Verlag, 2015.
- [26] D. C. Giancoli, „Wechselstromkreis,“ in *Physik Lehr und Übungsbuch*, Thübingen Leipzig, Pearson Verlag, 2010, p. 1035 ff.
- [27] F. Zach, „Filterung,“ in *Leistungselektronik*, Wien, Springer Vieweg, 2015, p. 2478 ff.
- [28] Atmel, 02 2017. [Online]. Available: http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet_Complete.pdf.
- [29] NANOTEC ELECTRONIC GmbH & Co. KG, „Nanotec Plug & Drive,“ [Online]. Available: http://de.nanotec.com/fileadmin/files/Handbuecher/NanoPro/NanoPro_Benutzerhandbuch_V2.3.pdf. [Zugriff am 18 12 2016].
- [30] 03 2017. [Online]. Available: http://www.atmel.com/Images/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf.
- [31] RS Components, 03 2017. [Online]. Available: <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/1420/0900766b814209a2.pdf>.
- [32] NANOTEC ELECTRONIC GmbH & CO. KG, 07 2008. [Online]. Available: <http://de.nanotec.com/fileadmin/files/Datenblaetter/Linearaktuatoren/LP/LP3575S0504-TR3.5X1.22.pdf>.
- [33] Raspberry PI Foundation, 03 2017. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>.
- [34] NANOTEC ELECTRONIC GmbH & Co. KG, „Nanotec Plug & Drive,“ [Online]. Available: http://de.nanotec.com/fileadmin/files/Handbuecher/Programmierung/Programmierhandbuch_V2.7.pdf. [Zugriff am 12 01 2017].

11 Weiterführende Literatur

NANOTEC ELECTRONIC GmbH & Co. KG, „Nanotec Plug & Drive,“ [Online]. Available:

http://de.nanotec.com/fileadmin/files/Handbuecher/Motorcontrols/SMCI36_Technisches_Handbuch_V1-3_de.pdf. [Zugriff am 11 10 2016].

W. Böhm, Elektrische Antriebe, 7 Hrsg., Weinstadt: Vogel Buchverlag, 2009.

P. Busch, Elementare Regelungstechnik, Vogel Business MEdia, 2012.

S. Christensen, 12 01 2014. [Online]. Available: http://vbn.aau.dk/ws/files/181568921/Design_of_a_Stewart_Gough_Platform_as_a_Test_Setup.pdf. [Zugriff am 02 12 2017].

Bastian Peter, et al, Fachkunde Elektrotechnik, 23. Hrsg., Wien: Verlag und Vertriebs Gesellschaft m.b.H., 2002

I. Esteban, Anforderungsgerechte Optimierung von Hexapode-Strukturen für Werkzeugmaschinen mit Hilfe genetischer Algorithmen, U. H. Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. mult, Hrsg., Stuttgart: Eigenverlag. Ignacio Esteban, 2007.

Elmar Schrüfer, Elektrische Messtechnik, 11 Hrsg., München: Fachbuchverlag Leipzig, 2012.

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: ausgeführter Testhexapode.....	9
Abbildung 2: Idealisierte Darstellung eines Hexapodens in Ausführung als gleichseitiges Dreieck mit möglicher Verschiebung in Pfeilrichtung in grau strichliert	10
Abbildung 3: Hexapode mit Koordinatensystemen.....	11
Abbildung 4: Relativkoordinatensystem mit Verdrehungen und Verschiebungen	11
Abbildung 5: Flugsimulator [9].....	14
Abbildung 6: AMiBA HEXAPOD TELESCOPE MOUNT [2]	14
Abbildung 7: Positioniergerät der FA PI [10].....	15
Abbildung 8: Quickstep [4]	15
Abbildung 9: Flexpicker von ABB [11]	16
Abbildung 10: Micromat 6X Fräsmaschine [12].....	17
Abbildung 11: Radladerfront mit konventioneller Kinematik links und mit Sechsen-Achsen-Parallelkinematik rechts [13]	17
Abbildung 12: Prinzip 2 Phasen Schrittmotor mit Unipolarwicklung, aus [16] S. 78 ..	19
Abbildung 13: Steuersignal für Vollschrittbetrieb [18].....	20
Abbildung 14: Steuersignal für Wave-Betrieb [18].....	21
Abbildung 15: Steuersignal für Halbschrittbetrieb [18].....	21
Abbildung 16: Steuersignal für Wave-Betrieb mit möglicher Duty-Cycle-Reduction..	22
Abbildung 17: Unterschiedliche Signale für den Motorstrom [16] S. 80.....	23
Abbildung 18: Schema der Energieversorgung des S4 EGSE	26
Abbildung 19: Schema der Vernetzung zwischen den Hauptbaugruppen.....	27
Abbildung 20: 3D-CAD-Image des ECHO-Mechanismus [RUAG Space Austria]	32
Abbildung 21: Komponenten des EGSE	35
Abbildung 22: Schaltplan der Filterplatine	39
Abbildung 23: Darstellung der Filter-Platine in Eagle	40
Abbildung 24: Schema der Starting Current im S4 EGSE	45
Abbildung 25: Schema der Starting-Current im ECHO-EGSE.....	47
Abbildung 26 : Versuchsaufbau mit Mikrocontroller und L298-Vollbrückenschaltung	49
Abbildung 27: SMC1 36 auf der Filterplatine mit Frontpanel	51
Abbildung 28: Anschlüsse auf der Rückwand von Innen betrachtet.....	52
Abbildung 29: Montage der Netzgeräte und Verteilerschiene auf der Grundplatte....	53
Abbildung 30: 19-Zoll-Gehäuse mit Mutterverdrahtung und mehreren Komponenten	55
Abbildung 31: Frontansicht des z.T. fertiggestellten EGSE.....	56
Abbildung 32: Platine mit Mikrocontroller, L 298 und Frontpanel mit Bedienelementen von hinten.....	58
Abbildung 33: Frontpanel der Starting-Current und Lochplatine von unten.....	59

Abbildung 34: Schema der Gelenkpunkte am Endeffektor und der Grundplatte im Grundriss.....	61
Abbildung 35: Erste Teile einer Achse	63
Abbildung 36 :Linearaktuator der Firma Nanotec vom Typ LP3575S0504-TR3.5X1.22 [32]	63
Abbildung 37: Einzelteile einer Achse	64
Abbildung 38 : Fertig montierte Achsen 3 und 4.....	65
Abbildung 39 : Bewegungsspielraumerweiternde Befestigung der Gelenkköpfe	66
Abbildung 40: Oberer Gelenkpunkt des Test-Hexapods	67
Abbildung 41: Raspberry PI 3 [33].....	71
Abbildung 42: Programmstruktur des ECHO-EGSE.....	72

13 Formelverzeichnis

(1).....	10
(2).....	12
(3).....	12
(4).....	12
(5).....	12
(6).....	12
(7).....	12
(8).....	12
(9).....	13
(10).....	19

14 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Komponenten des S4 EGSE	28
Tabelle 2: Analoge Signal zwischen S4 EGSE und Messgerät	30
Tabelle 3: Binäre Signale zwischen S4 EGSE und Messgerät.....	30
Tabelle 4: Hauptbaugruppen des ECHO EGSE	36
Tabelle 5: Komponenten der Filterplatine.....	37
Tabelle 6: ICs der Starting-Current im S4 EGSE.....	43
Tabelle 7: Spannungsversorgung der Starting-Current im S4 EGSE	43
Tabelle 8: Signale der Starting-Current im S4 EGSE	44
Tabelle 9: Komponenten der Starting-Current im ECHO-EGSE.....	46
Tabelle 10: Spannungsversorgung der Starting-Current im ECHO-EGSE	48
Tabelle 11: Binäre Signale der Starting-Current im ECHO-EGSE.....	48
Tabelle 12: Analoge Signale der Starting-Current im ECHO-EGSE.....	48
Tabelle 13: Testprozedur für Filter und SMCI 36.....	51
Tabelle 14: Spannungsniveaus innerhalb des EGSE.....	53
Tabelle 15: Elemente am Frontpanel der Starting Current	60
Tabelle 16: Standardtests zur Qualitätssicherung	68
Tabelle 17: Überprüfung der Mutterverdrahtung	68
Tabelle 18: Messung der Komponenten im Verbund	69
Tabelle 19: Überprüfung der einzelnen Stromkreise	69
Tabelle 20: Überprüfung der SMCI 36 und der Kommunikation.....	70
Tabelle 21: Klassen im Steuerprogramm	72
Tabelle 22: Programmablauf für Referenzfahrt	73

15 Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
d.h.	das heißt
EGSE	Electronical Ground Support Equipment
etc.	et cetera
exkl.	exklusive
SPS	Speicher Programmierbare Steuerung
i.d.R	in der Regel
IC	Integrated Circuit
inkl.	Inklusive
lt.	laut
I/O	Input Output
Min.	Minuten
o.g.	oben genannt
Sek.	Sekunden
Std.	Stunden
Stk.	Stück
tlw.	teilweise
PWM	Puls Weiten Moduliert
u.a.	unter anderem
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel
PCB	Printed Circuit Board
LED	Light Emitting Diode
HF	High Frequenzy