



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Emma Streng

Entwicklung, Konstruktion und Inbetriebnahme einer Roboterzelle für den kooperativen Einsatz einer Parallelkinematik mit einem Scara

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

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

Emma Strenge

**Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme
einer Roboterzelle für den kooperativen
Einsatz einer Parallelkinematik mit einem
Scara**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

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

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Thomas Frischgesell

Zweitprüfer: Ing. Robin Auffermann

Abgabedatum: 8. Juni 2020

Zusammenfassung

Emma Streng

Thema der Bachelorarbeit

Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme einer Roboterzelle für den kooperativen Einsatz einer Parallelkinematik mit einem Scara

Stichworte

Industrieroboter, Scara, Parallelkinematik, Omron, ACE- Programmierumgebung, Faulhaber Motion Manager 6, Motion Control System, RS-232, Sicherheitskonzept, AOPD, Sauggreifsystem, Modalanalyse

Kurzzusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit liegt in dem Aufbau eines Laborversuchsstandes für die kooperative Zusammenarbeit zwischen einem Scara und einer Parallelkinematik von Omron. Der Versuchsstand soll innerhalb von Labor- und Lehrveranstaltungen Kompetenzen im Umgang mit kooperierenden Industrierobotern vermitteln. Das Ansteuern der Roboter erfolgt mittels einer Systemlösung von Omron über den SmartController EX und die ACE- Programmierumgebung Version 4.0. Eine Übergabestation zwischen den Robotern überführt die Greifobjekte zwischen den Arbeitsräumen der Roboter. Angetrieben wird die Übergabestation mit einem Motion Control System von Faulhaber. Die Konfiguration der Regelparameter erfolgt über den Faulhaber Motion Manager 6, das Ansteuern über die RS-232 Schnittstelle mittels des SmartController EX. Für die Parallelkinematik wird ein Montagegerahmen entwickelt, welcher zugleich die Roboterzelle darstellt. Die Auslegung erfolgt mittels einer Modalanalyse sowie einer statisch- mechanischen FEM- Berechnung mit ANSYS Workbench 19.0. Die Verifizierung des Ergebnisses findet über eine Frequenzmessung statt. Ein elektrisch- pneumatisches Sauggreifsystem von Festo wird als Greifmechanismus für die Parallelkinematik ausgetestet und verwendet. Für den Versuchsaufbau wird ein Sicherheitskonzept entwickelt und implementiert. Das Ergebnis beinhaltet Verfahrensanweisungen und die Notwendigkeit des Einbaus einer Sicherheitslichtschranke. Der Abschluss dieser Arbeit bildet eine demonstrative Pick- und Place Anwendung. Diese Arbeit dient als Grundlage für weitere Projekte mit dem Versuchsstand.

Emma Streng

Title of the paper

development, installation and commissioning of a robot cell for the collaborative efforts of a parallel kinematics and a scara

Keywords

industrial robots, Scara, parallel kinematic, Omron, ACE- programming environment, Faulhaber Motion Manager 6, Motion Control System, RS-232, safety concept, AOPD, suction gripping system, modal analysis

Abstract

The aim of this work is to set up a laboratory test rig for the cooperative collaboration between a Scara and a parallel kinematics system from Omron. The experimental setup is intended to impart skills in dealing with cooperating industrial robots within laboratory and teaching courses. The robots are controlled by a system solution from Omron via the SmartController EX and the ACE- programming environment version 4.0. A transfer station between the robots transfers the gripping objects between the robots' workspaces. The transfer station is driven by a Faulhaber Motion Control system. The Faulhaber Motion Manager 6 is used to configure the control parameters and the SmartController EX to control the system via the RS-232 interface. A mounting frame is being developed for the parallel kinematics, which also represents the robot cell. The design is based on a modal analysis as well as a static mechanical FEM- calculation with ANSYS Workbench 19.0. The verification of the result is done by a frequency measurement. An electric-pneumatic suction gripping system from Festo is designed and used as a gripping mechanism for the parallel kinematics. A safety concept is developed and implemented for the test setup. The result includes procedural instructions and the need to install a safety light barrier. The final part of this work is a demonstrative pick-and-place application. This work serves as a basis for further projects with the experimental setup.

Danksagung

Mein Dank gilt an dieser Stelle Prof. Dr. Thomas Frischgesell, Ing. Robin Auffermann und Dipl.- Ing. Carolina Bohnert für die Möglichkeit und das entgegengebrachte Vertrauen das Projekt durchzuführen.

Außerdem möchte ich mich bei den Mitarbeitern vom IWS und den angehenden Schweißfachingenieuren für das Schweißen des Montagerahmens und die tatkräftige Unterstützung beim Aufbau der Konstruktion bedanken.

Abschließend möchte ich mich noch bei meinen Freunden und meiner Familie für ihre Unterstützung und Begleitung, während meines Studiums, bedanken.

Emma Streng

Hamburg, den 08.06.2020

Aufgabenstellung



Aufgabenstellung

für die Bachelorthesis

von Frau Emma Streng

Matrikel-Nummer: 2312660

Thema:

Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme einer Roboterzelle für den kooperativen Einsatz einer Parallelkinematik mit einem Scara

Beschreibung:

Im Zentrum für industrielle Robotik soll ein neuer Versuchsaufbau realisiert werden, in dem eine Parallelkinematik (Hornet 565) und ein Scara-Roboter (eCobra 600) kooperativ mit einer Übergabestation im gemeinsamen Arbeitsraum arbeiten sollen.

Schwerpunkte der Arbeit liegen in der Konstruktion eines Montagerahmens zur Aufnahme des Hornet 565 von Omron Adept und Integration des vorhandenen Scara Roboters. Für den Hornet 565 ist weiterhin ein geeigneter Greifmechanismus auszuwählen und zu beschaffen. Für den neu beschafften Hornet 565 erfolgt eine Erstinbetriebnahme. Für beide Roboter wird ein Sicherheitskonzept erarbeitet.

Für den gemeinsamen Arbeitsraum werden beispielhaft kollaborative Aufgaben entwickelt und getestet. Dabei ist insbesondere auf einen sicheren Ablauf und Taktzeitoptimierung zu achten.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Aufgabenstellung	ii
Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	viii
Abkürzungsverzeichnis	ix
Physikalische Konstanten und Symbolverzeichnis	x
1 Einführung	1
2 Schlüsselkomponenten	3
2.1 eCobra 600 Standard	3
2.2 Hornet 565 4 Axis Standard	5
2.3 SmartController EX	8
2.4 Motion Control System	9
2.5 ACE- Programmierumgebung	12
3 Konstruktion des Montagerahmens	15
3.1 Anforderungen an den Montagerahmen	15
3.2 Analyse des Omron- Konstruktionsentwurfes	17
3.3 Entwicklung des Montagerahmens	20
3.4 Berechnung des Montagerahmens	26
3.5 Verifikation des berechneten Montagerahmens	28
3.6 Traglastanalyse der Decke	30
4 Robotersystem und Integration	32
4.1 Greifmechanismen	32
4.1.1 Parallelgreifer am eCobra 600	33

4.1.2	Pneumatisch- elektrisches Sauggreifsystem am Hornet 565	35
4.2	Übergabestation	41
4.2.1	Drehplatte	41
4.2.2	Aufbau der Übergabestation	42
4.3	Zusammenbau des Robotersystems	44
5	Sicherheit Robotersystem und Integration	49
5.1	Grenzen der Maschine	51
5.2	Identifizierung, Risikoeinschätzung und Risikobewertung der Gefähr- dungen	52
5.3	Risikominderung	56
5.4	Bewertung des Sicherheitskonzeptes	59
6	Entwicklung demonstrativer Anwendungen	60
6.1	Hornet vs. eCobra	61
6.2	Kooperative Zusammenarbeit	62
7	Zusammenfassung	63
8	Ausblick	65
	Literatur	67
A	Anhang zu Kapitel 3	70
A.1	Zeichnungen des Montagerahmens	70
A.2	Frequenzmessungen am Montagerahmens	80
B	Anhang zu Kapitel 4	81
B.1	Elektrischer Parallelgreifer MEG 40 EC	81
B.2	Sauggreifsystem	84
B.3	Zeichnungen der Übergabestation	90
B.4	Zusammenbau des Robotersystems	97
C	Anhang zu Kapitel 5	101
D	Anhang zu Kapitel 6	104

Abbildungsverzeichnis

2.1	Drauf- und Seitenansicht des eCobra 600 Standard	4
2.2	Arbeitsraum des eCobra 600 Standart	5
2.3	Arbeitsraum und Seitenansicht des Hornet 565 4 Axis Standard	6
2.4	Draufsicht des Hornet 565 4 Axis Standard	7
2.5	Hornet J4- Plattform Draufsicht	7
2.6	Armvolumen des Hornet 565 4 Axis Standard	7
2.7	SmartController EX	9
2.8	Maßzeichnung des Programmieradapter	10
2.9	Maßzeichnung des Motion Control Systems	11
2.10	Übersicht Faulhaber Motion Manager 6 Programmierumgebung	12
2.11	Übersicht der ACE- Programmierumgebung.	13
3.1	Grundriss und Aufriss der Laborumgebung	16
3.2	Konstruktionsentwurf von Omron	18
3.3	Unter- und Detailansicht Konstruktionsentwurf von Omron	19
3.4	Hornet 565 und eCobra 600 im Montagerahmen mit Arbeitsräumen	21
3.5	Hornet 565 und eCobra 600 im Montagerahmen mit Bewegungs- und Arbeitsräumen	22
3.6	Ansicht von Unten: Positionierung vom Hornet 565 und eCobra 600 im Montagerahmen	25
3.7	Berechnete Eigenfrequenzen am Montagerahmen	27
3.8	Berechnete Vergleichsspannung nach „von Mises“ am Montagerahmen	27
3.9	Berechnete Auslenkung am Montagerahmen	28
3.10	Gemessene Eigenfrequenzen am Montagerahmen	29
4.1	Schaltplan des Sauggreifersystems	35
4.2	Aufbau des Greifsystems am TCP des Hornet 565	37
4.3	Installation des Greifmechanismus am TCP des Hornet 565	38
4.4	Zusammenbau der Übergabestation	42
4.5	Details der Übergabestation	43

4.6	Montagerahmen mit Hornet 565, eCobra 600 und Drehplatte	44
4.7	Roboterzelle mit Integrationen	45
4.8	Details der Roboterzelle	46
4.9	Schema zum systemtechnischen Aufbau der Roboterzelle	47
5.1	Schematische Darstellung des dreistufigen iterativen Prozesses zur Risikominimierung	50
5.2	Diagramm der Flugbahn von herausgeschleuderten Greifobjekten . . .	55
5.3	Prozess zur Risikominderung aus Sicht des Konstrukteurs	57
6.1	Schematische Darstellung der eingeteachten Punkte	61
A.1	Stückliste Montagerahmen	71
A.2	Zeichnung E9 Montageplatte mit Roboterarmausschnitt	72
A.3	Zeichnung G4 UPE-Profil Pfeiler	73
A.4	Zeichnung G5 Pfeiler Links	74
A.5	Zeichnung G6 Pfeiler Rechts	75
A.6	Zeichnung G7 Pfeiler Kurz	76
A.7	Zeichnung G8 Montageplatte mit Zylinder	77
A.8	Zeichnung G9 Profiltragwerk	78
A.9	Zeichnung Z1 Montagerahmen	79
B.1	Diagramm Geschwindigkeitseinstellung am Controller MEG C 40 . . .	82
B.2	Diagramm Hubeinstellung am Controller MEG C 40	82
B.3	Diagramm Greifkraftseinstellung am Controller MEG C 40	83
B.4	Abreißkraft in Abhängigkeit von Saugerdurchmesser und -form	85
B.5	Diagramm zum Ermitteln der Evakuierungszeit t_{E1} in Abhängigkeit vom Vakuum p_u für 1 l Volumen bei 6 bar Betriebsdruck der Vakuumsaugdüse	87
B.6	Datenblatt der Vakuumsaugdüse VN-14-H-T4-PQ3-VQ3-R02-M	88
B.7	Eigenschaften der Vakuumsaugdüse in Abhängigkeit vom Betriebsdruck	88
B.8	Zeichnung Adapterplatte des Sauggreifers	89
B.9	Stückliste Übergabestation	90
B.10	Zeichnung D1 Befestigungsplatte für Drehplatte	91
B.11	Zeichnung D2 Drehplatte	92
B.12	Zeichnung D3 Befestigungselement Drehplatte- Motor	93
B.13	Zeichnung D4 Klemmblock	94
B.14	Zeichnung D2 Zusammenbau Drehplatte- Motor	95
B.15	Zeichnung Unterbau Abstützrolle	96

B.16 3D- gedruckte Abdeckungen	97
B.17 Elektrische Anschlüsse Sicherheitslichtschranke	97
B.18 Schaltplan Seite 1	98
B.19 Schaltplan Seite 2	99
C.1 Diagramme zu den Anhaltezeiten des eCobra 600 und des Hornet 565 mit J4- Plattform	103
D.1 Übersicht der Position der eingeteachten Punkte des eCobra	104
D.2 Übersicht der Position der eingeteachten Punkte des Hornet	104
D.3 Programmcode gripperopen()	105
D.4 Programmcode gripperclose()	105
D.5 Programmcode gripperprecond()	106
D.6 Programmcode ecobravs()	107
D.7 Programmcode hornetvs()	108
D.8 Parameterdatei des Motion Control Systems	109
D.9 Programmcode serialmotor()	110

Tabellenverzeichnis

2.1	Hornet 565 4 Axis Standard Taktzeiten	8
3.1	Mechanische Eigenschaften von Kohlenstoffstahl im Vergleich	21
3.2	Traglastannahmen	30
4.1	Übersicht und Eigenschaften der Greifobjekte	33
4.2	Technische Daten Greifer MEG 40 EC	34
4.3	Technische Daten Controller MEG C 40	34
4.4	Fallunterscheidung der Haltekraftauslegung bei Saugern	36
4.5	Gesamtmasse am TCP des Hornet 565	40
5.1	Energiegrenzwerte auf der Grundlage des Modells der Körperregionen .	55
A.1	Komponentenübersicht für die Frequenzmessung	80
B.1	Klemmbelegung am Controller MEG C 40	81
B.2	Gesamtes zu evakuierendes Volumen	87
B.3	XIO Termination Block Belegung der digitalen Ein- und Ausgänge . . .	100
B.4	IO Blox Belegung der digitalen Ein- und Ausgänge	100

Abkürzungsverzeichnis

ACE	Automotion Control Environment
AOPD	aktive optoelektrische Schutzeinrichtung
Digital I/O's	Digitale Ein- und Ausgänge
HPL	High Pressure Laminate
FireWire	IEEE 1394
IWS	Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik
PL	Performance Level
SIL	safety integrity level bzw. Sicherheitsanforderungsstufe
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung bzw. programmable logic controller (PLC)
TCP	Tool Center Point bzw. Endeffektor des Manipulators

Physikalische Konstanten und Symbolverzeichnis

A	Fläche	m^2
a	Beschleunigung	m s^{-2}
a_{krit}	kritische Beschleunigung	m s^{-2}
b	Breite	mm
E_{kin}	kinetische Energie	J
F_A	Abreißkraft	N
F_H	Haltekraft	N
f	Eigenfrequenz	Hz
g	Erdbeschleunigung	$9,81 \text{ m s}^{-2}$
h	Höhe	mm
l	Länge	mm bzw. cm
m	Masse	g bzw. kg
m_G	Gesamtmasse	g
n	Anzahl der Sauger	-
p_u	Vakuum	bar bzw. %
p_1	Betriebsdruck	bar
q_k	Verkehrslast	N m^{-2}
q_{ns}	Saugvolumenstrom	l m^{-1}
R	Radius	mm
S	Sicherheitsbeiwert	-
t_B	Deevakuierungszeit bzw. Belüftungszeit	s
t_{B1}	Deevakuierungszeit für 1000 cm^3	s
t_E	Evakuierungszeit	s
t_{E1}	Evakuierungszeit für 1000 cm^3	s
U	Spannung	V
V_G	Gesamtvolumen	cm^3
v	Geschwindigkeit	mm s^{-1}
v_{max}	maximale Geschwindigkeit	m s^{-1}
μ	Reibbeiwert	-
\emptyset	Durchmesser	mm

1 Einführung

Industrieroboter stellen einen integralen Bestandteil in der heutigen Industrie dar. Im Jahr 2018 waren bereits 2,4 Millionen Industrieroboter weltweit im Einsatz. Diese Anzahl soll sich laut Prognosen der International Federation of Robotics im Jahr 2020 auf 3 Millionen Industrieroboter erhöhen. Dies entspricht einem jährlichen Zuwachs von 13 % und einem Trend, welcher sich in den kommenden Jahren weiter fortsetzen soll [1]. Bereits im Jahr 2018 sind in Deutschland 338 Industrieroboter je 10.000 Beschäftigte im verarbeitenden Gewerbe zu verzeichnen, ein Zuwachs von 26 % im Vergleich zum Vorjahr [2].

Deutschland gehört zu den führenden Nationen im Bereich Robotik. Diese Stellung ist sowohl auf das frühzeitige Einführen von Robotertechnologien zu Beginn der 90er Jahre, als auch auf die enge Zusammenarbeit zwischen Forschung, Entwicklung und Anwendung seither, zurückzuführen. Über 50 % der deutschen Maschinenbauer arbeiten bereits mit Robotertechnologien in ihrem Berufsalltag [3].

Um das Angebot für Lehre und Forschung an der HAW Hamburg für Studenten im Bereich von Industrierobotik zu erweitern, soll im Zentrum für Industrierobotik ein neuer Versuchsstand aufgebaut werden. Dieser Versuchstand soll den Studenten einen umfassenden Einblick in das Arbeiten mit kooperierenden Robotern vermitteln. Basierend auf diesem Versuchsstand sollen Studenten praktische Erfahrungen im Umgang mit Industrierobotern sammeln und auf das Arbeiten mit Robotertechnologien im späteren Berufsleben vorbereitet werden. Der Einsatz und Betrieb des Versuchsaufbaus ist für den Laborbetrieb innerhalb von Lehrveranstaltungen und Projekt- sowie Abschlussarbeiten vorgesehen.

Das Ziel dieser Arbeit besteht in dem Aufbau und der Inbetriebnahme eines Versuchsaufbaus für die kooperative Zusammenarbeit zweier Roboter im Verbund und einem demonstrativen Anwendungsbeispiel im Rahmen einer Pick- und Place- Anwendung. In dem neuen Versuchsaufbau wird der bereits vorhandene Roboter vom Typ Scara integriert und um eine neu beschaffte Parallelkinematik ergänzt. Außerdem soll eine sich

drehende Übergabestation zwischen den Robotern integriert werden, um das Überführen der Greifobjekte zwischen den Robotern zu gewährleisten. Ein Sicherheitskonzept ist ebenfalls Bestandteil dieser Arbeit. Durch den Einsatz der Parallelkinematik können hochdynamische Anwendungen dargestellt werden. Der Scara ist ein eCobra 600 Standard, für die Parallelkinematik wird ein Hornet 565 4 Axis Standard verwendet. Beide Roboter sind von Omron Industrial Automation (Omron) und daher für eine kooperative Zusammenarbeit werksseitig ausgelegt. Das Ansteuern der Roboter erfolgt über die vom Hersteller entwickelte ACE- Programmierumgebung (Automation Control Environment). Die Software ist frei im Internet verfügbar. Über die Software können Programmierarbeiten dezentral und unabhängig vom eigentlichen Versuchsaufbau durchgeführt werden und später am Versuchsaufbau praktisch angewendet werden. Das Arbeiten über die Software bietet sich daher für den geplanten Laborbetrieb in Bezug auf Lehrveranstaltungen an und ist mit studentischen Mitteln umsetzbar. Das Ansteuern der Roboter kann prinzipiell auch über eine SPS (speicherprogrammierbare Steuerung) realisiert werden, dies ist jedoch für den geplanten Anwendungsfall nicht handhabbar.

Diese Arbeit thematisiert zunächst die grundlegenden Schlüsselkomponenten, sprich die Bestandteile, die maßgebend für den Versuchsaufbau sind. Um den Hornet 565 ordnungsgemäß Betreiben zu können, wird ein Montagerahmen benötigt. Die Konstruktion des Montagerahmens erfolgt in Anlehnung an die vom Hersteller entworfene Montagevorrichtung. Kapitel 3 sind die Anforderungen an den Montagerahmen sowie eine detaillierte Analyse des Herstellerrahmens zu entnehmen. Auf dieser Basis entsteht die Neukonstruktion des Montagerahmens, welcher zusätzlich die Roboterzelle darstellt. Außerdem erfolgt eine Traglastanalyse der Decke, infolge des zusätzlichen Lasteintrages. In Kapitel 4 werden das Robotersystem und dessen Integrationen betrachtet. Das Kapitel unterteilt sich in die ausgewählten Greifmechanismen der Roboter, die Übergabestation und den Auf- und Zusammenbau des Robotersystems. In Kapitel 5 wird das Sicherheitskonzept für den Versuchsaufbau vorgestellt. Das Erarbeiten des Sicherheitskonzeptes ist ein iterativer Prozess. Allein der Endzustand des Konzeptes wird in den anderen Kapiteln dieser Arbeit thematisiert. Eine demonstrative Anwendung mit dem Versuchsstand wird in Kapitel 6 entwickelt. Die Prozessabfolge unterteilt sich in das Aufnehmen, Übergeben sowie Ablegen der Greifobjekte. Den Abschluss der Arbeit bilden die Zusammenfassung und das Fazit gefolgt vom Ausblick. Der Ausblick thematisiert zukünftige Erweiterungen am Versuchsstand für eine dynamischere Anwendung.

2 Schlüsselkomponenten

Die im Nachfolgenden aufgeführten Komponenten bilden die Grundlage für die Entwicklung des Laborversuchs. Es handelt sich hier ausschließlich um die wichtigsten Komponenten in ihrer verwendeten Ausführung.

2.1 eCobra 600 Standard

Der eCobra 600 Standard ist ein 4-Achs Industrieroboter des Types Scara der Firma Omron Industrial Automotion, kurz Omron. Die Achsen 1, 2 und 4 sind rotatorische Achsen, Achse 3 ist translatorisch [4]. Die Rotationsachse 4 bewirkt eine Rotation des Tool Center Points (TCP) um Theta $\pm 360^\circ$ mit einer Wiederholgenauigkeit von $\pm 0,019^\circ$ [5]. Die Reichweite des eCobra liegt in einem Radius von $162,5 \text{ mm} \leq X \leq 600 \text{ mm}$ (vgl. Abbildung 2.1 und 2.2). Der 41 kg schwere eCobra darf zusätzlich mit einer Nutzlast bis zu 5,5 kg am Roboterflansch betrieben werden, ohne dass die Lebensdauer beeinträchtigt wird. Die Nutzlast beinhaltet den Lasteintrag durch zu bewegende Objekte und hinzukommende Integrationen. Bei einer Nutzlast von 2,0 kg beträgt die Taktzeit 0,55 s. Neben der Schnelligkeit zeichnet sich der Roboter auch durch eine hohe Wiederholgenauigkeit aus, in X- und Y- Richtung beträgt diese $\pm 0,017 \text{ mm}$. In Z- Richtung liegt eine Wiederholgenauigkeit von $\pm 0,003 \text{ mm}$ vor. Diese Richtung ist präziser, da die Linearachse sich langsamer bewegt als die Rotationsachsen und die Positionsfehler sich aufgrund der seriellen Kinematik nicht aufsummieren können, weil nur Achse 3 Einfluss auf die Z- Richtung hat. In Z- Richtung ist der eCobra in einem Bereich von $177 \text{ mm} \leq Z \leq 387 \text{ mm}$ einsetzbar. Für eine bestimmungsgemäße Montage wird der Roboter auf einem Tisch fixiert, der Arbeitsraum befindet sich daher um den eCobra herum. Das Statusdisplay, welches in die positive X- Richtung zeigt, gibt Aufschluss über den Zustand des eCobra. Roboter der Bauart Scara können nur planparallele Arbeiten verrichten. Sie eignen sich daher für Montage oder Pick- und Place- Anwendungen.

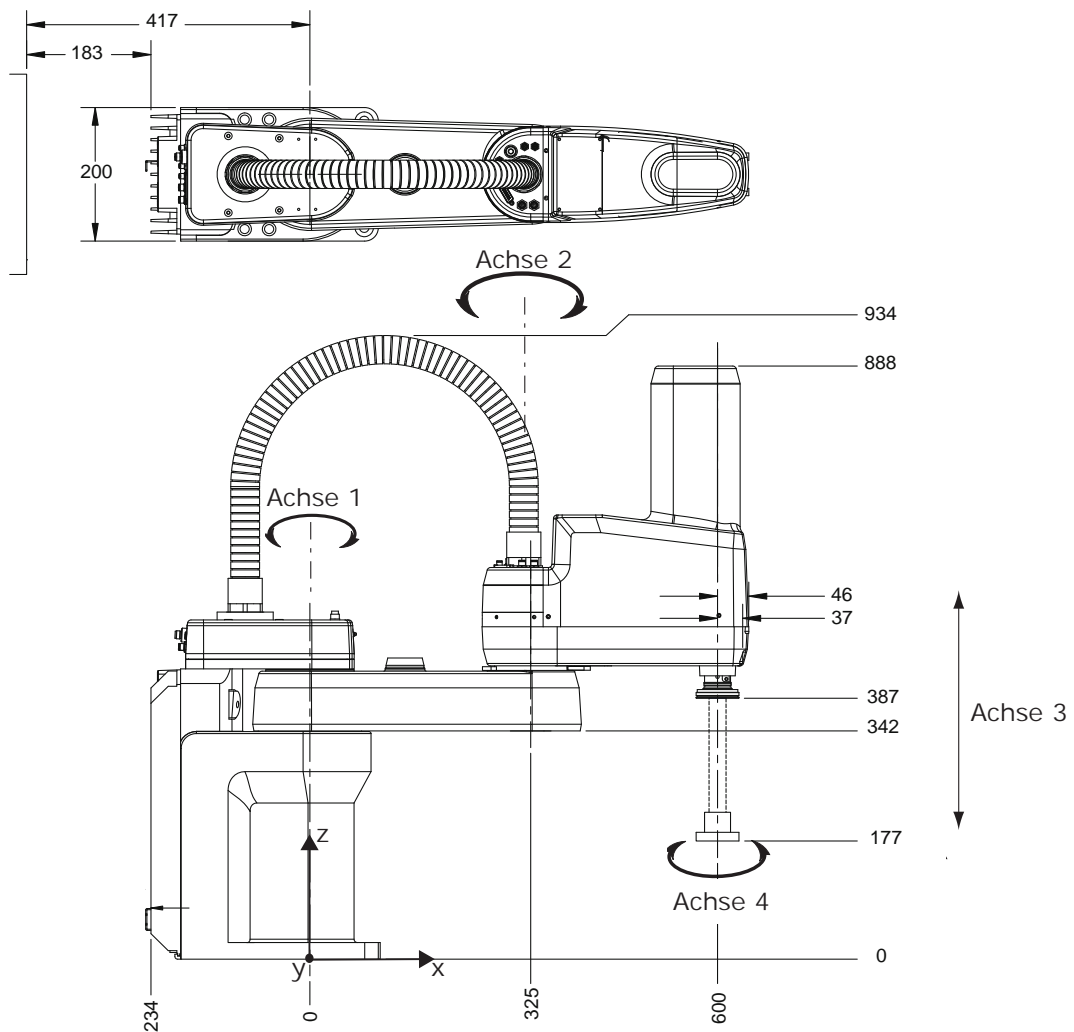


ABBILDUNG 2.1: Drauf- und Seitenansicht des eCobra 600 Standard.
(in Anlehnung an [4])

Über den eAIB Controller wird der eCobra mit Leistung versorgt und angesteuert. Der Controller befindet sich in der Basis des Roboters und stellt die Grundlage der Roboterprogrammierung und -kommunikation dar. Einerseits kann der Roboter über das vom Controller bereitgestellte eV+ Operation System betrieben werden, andererseits ist auch ein Betrieb mittels SmartController EX, benutzerdefinierter SPS (speicherprogrammierbare Steuerung) oder mit der von Omron entwickelten SPS möglich [4]. Der eAIB stellt außerdem Schnittstellen zur Integration von zusätzlichen Sicherheitseinrichtungen und digitalen Ein- und Ausgängen (Digital I/ O's) bereit. Über die XIO-Schnittstelle wird der Adept XIO Termination Block zur Ansteuerung von Digital I/ O's angeschlossen. Am eCobra gibt es noch eine zusätzliche Digital I/ O Schnittstelle oberhalb des eAIB Controllers an der ergänzende digitale Ein- und Ausgänge mittels Adept IO Blox verfügbar sind.

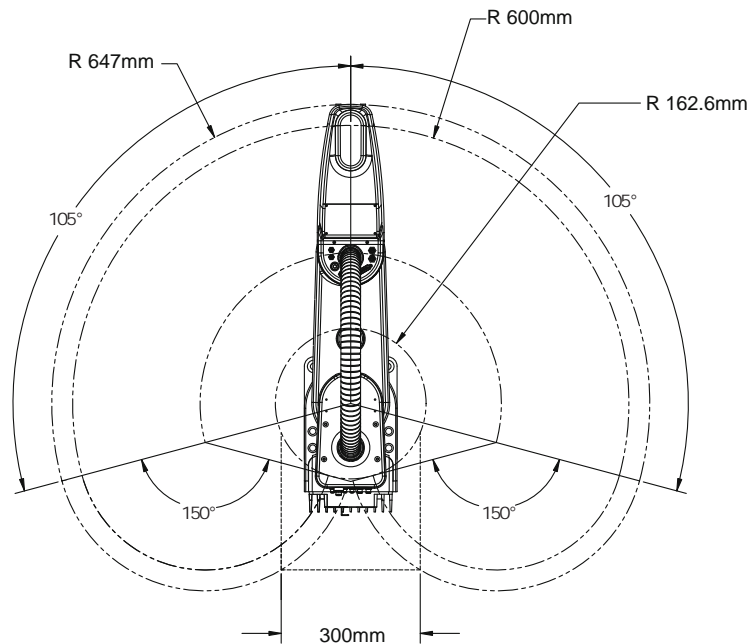


ABBILDUNG 2.2: Arbeitsraum des eCobra 600 Standard. (in Anlehnung an [4])

Weiterführende Informationen sind im eCobra User's Guide ([4]) auffindbar.

2.2 Hornet 565 4 Axis Standard

Der Hornet 565 4 Axis Standard ist ein 3-armiger Industrieparallelerroboter der Firma Omron in der 4-achsigen Ausführung. Über die drei identischen Armmotoren kann der Roboterflansch des Hornet gezielt in die X-, Y- und Z- Richtung verfahren werden [6]. Die vierte Achse wird über die Teleskopstange im Zentrum des Roboters angetrieben und ermöglicht eine Rotation des TCP um $\Theta \pm 360^\circ$ [5]. In der hier verwendeten Ausführung wiegt der Roboter 52 kg und ist für eine zusätzliche Nutzlast von bis zu 3 kg am Roboterflansch ausgelegt. Die Nutzlast berücksichtigt sowohl den Lasteintrag durch zu bewegende Objekte als auch durch hinzukommende Integrationen. Aufgrund seiner Bauart wird der Hornet oberhalb des Arbeitsraumes an drei Aufnahmepunkten montiert. Die platzsparende Deckenmontage ermöglicht einen, durch die Roboterbasis, unverbauten konzentrischen Arbeitsraum mit einem maximalen Durchmesser von 1130 mm (vgl. Abbildung 2.3 und 2.4). Der Arbeitsraum steht in direkter Abhängigkeit zu den Roboterarmen. Diese bestehen aus den motorisierten inneren Armen und

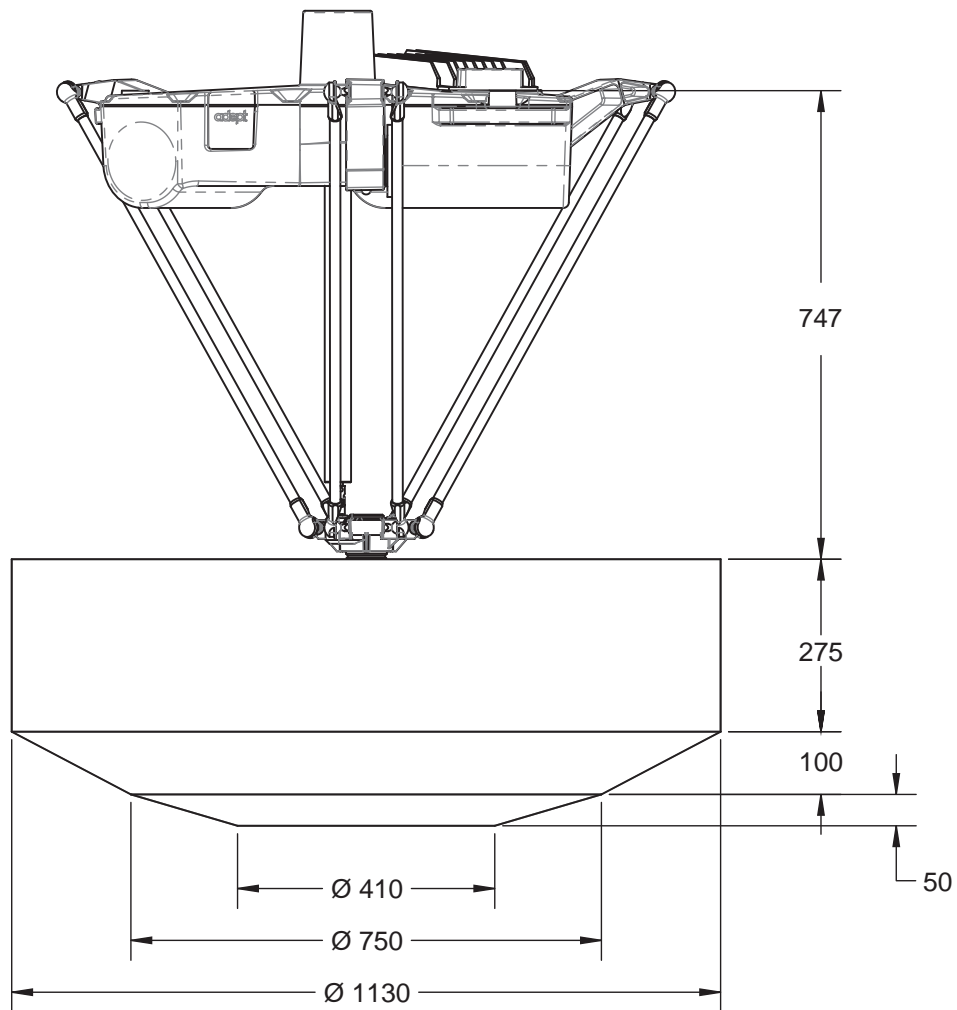


ABBILDUNG 2.3: Arbeitsraum und Seitenansicht des Hornet 565 4 Axis Standard. (in Anlehnung an [4])

den äußeren Armen aus Kohlefaser- Epoxid Stangen. Das durch die Arme aufgespannte Volumen ist in Abbildung 2.6 abgebildet. Die äußeren Arme stellen den gelenkig gelagerten Übergang zwischen den inneren Armen und der J4- Plattform dar. Die Lagerung unterdrückt die rotatorischen Effekte am Flansch, welcher dadurch parallel zum Arbeitsraum ist. Die J4- Plattform wandelt die einzelnen rotatorischen Armbewegungen in eine kartesische Gesamtbewegung um. Darüber hinaus verfügt die Plattform über ein 38 mm großes Loch im Inneren für die Verlegung von pneumatischen sowie elektrischen Leitungen zum Roboterflansch (vgl. Abbildung 2.5). Das in die positive X- Richtung orientierte Statusdisplay gibt Aufschluss über den Zustand des Roboters. Wie auch der eCobra 600 wird der Hornet 565 über den eAIB Controller angesteuert und kontrolliert (vgl. Abschnitt 2.1).

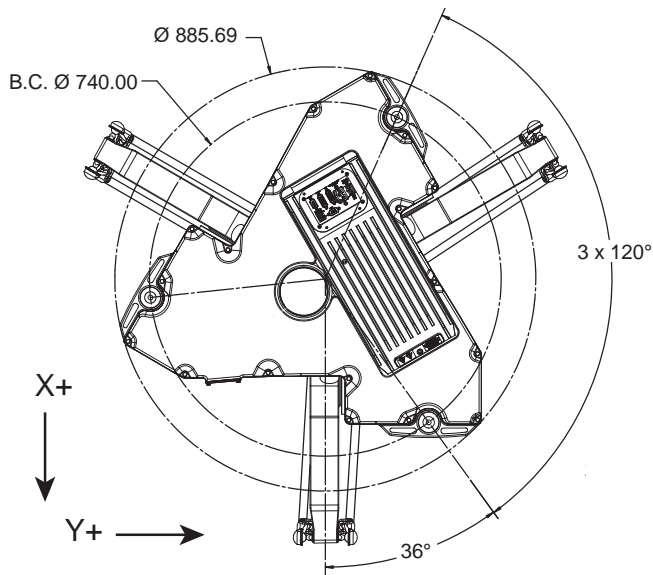


ABBILDUNG 2.4: Draufsicht des Hornet 565 4 Axis Standard (in Anlehnung an [6])

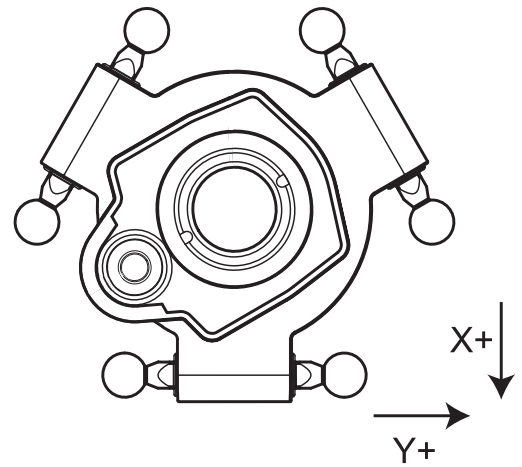


ABBILDUNG 2.5: Hornet J4- Plattform Draufsicht. (in Anlehnung an [6])

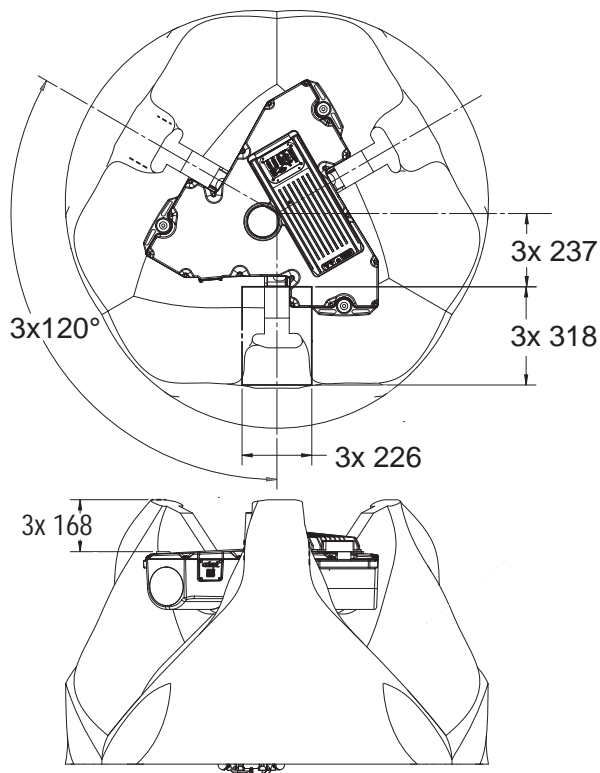
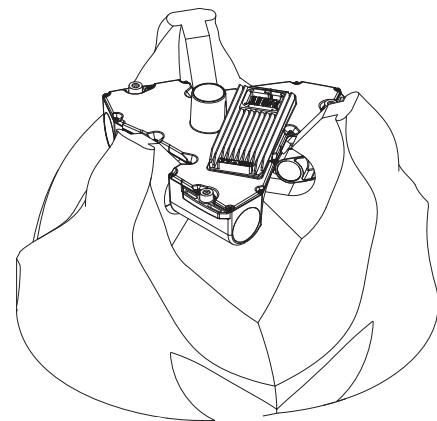


ABBILDUNG 2.6: Armvolumen des Hornet 565 4 Axis Standard. (in Anlehnung an [6])



Die Vorteile des Parallelroboters liegen in seiner Kombination aus hoher Geschwindigkeit, Beschleunigung und Präzision. Roboter dieses Types werden zumeist für hochdynamische Pick- und Place- Anwendungen eingesetzt. Die hohe Wiederholgenauigkeit von $\pm 0,10$ mm ergibt sich aus der Bauart [5]. Die Positionsfehler der Achsen werden nicht aufsummiert, sondern gehen nur anteilig in die Gesamtbewegung des Roboters ein. Die Abhängigkeit der Achsen untereinander führt jedoch zu einem geringen Bauraum- Arbeitsraum- Verhältnis, trotz der kompakten Bauweise der Basis. Die hohe Geschwindigkeit sowie Beschleunigung fundiert auf der geringen Masse der zu bewegend Bauteile. Je geringer die Nutzlast am Roboterflansch, desto schneller sind die Taktzeiten (vgl. Tabelle 2.1). Die hohe Schwinganfälligkeit der Konstruktion kann Auswirkungen auf die Taktzeit und die Positioniergenauigkeit des Roboters haben, daher ist auf eine ausreichend steife Gesamtlösung zu achten.

	Taktzeiten [s]
Nutzlast 0,1 kg	0,35
Nutzlast 1 kg	0,37
Nutzlast 3 kg	0,42

TABELLE 2.1: Hornet 565 4 Axis Standard Taktzeiten. (in Anlehnung an [5])

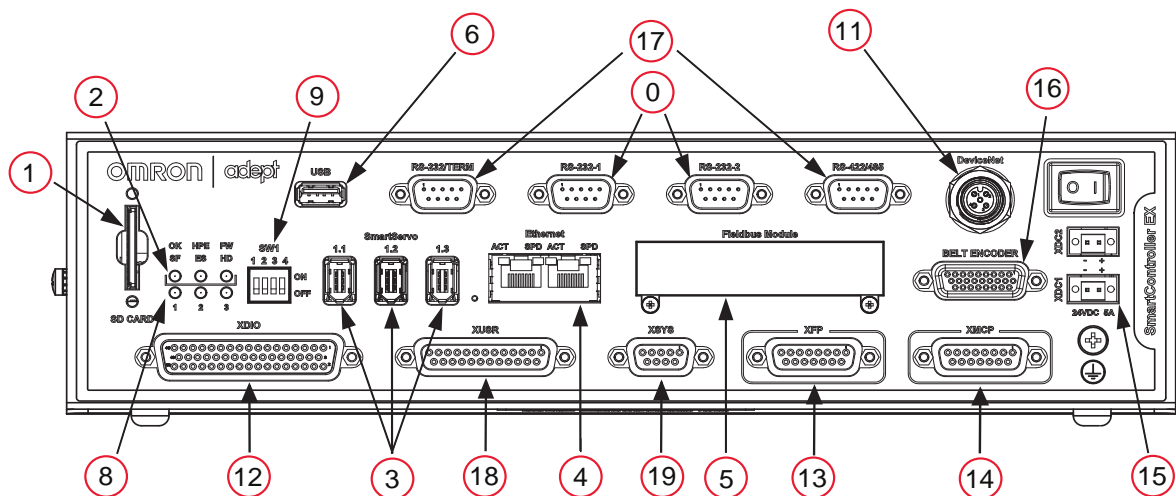
Weitere Informationen sind dem Hornet 565 User's Guide ([6]) zu entnehmen.

2.3 SmartController EX

Der SmartController EX ist eine dezentrale Hochleistungs-Bewegungssteuerung von Omron [5]. Die Steuerung ist für den Einsatz innerhalb der Produktfamilie von Omron konzipiert. Der Controller unterstützt ein Multi-Robot-System bestehend aus bis zu 4 Robotern der Typen Quattro, Hornet, eCobra oder Viper [7]. Ohne den SmartController EX ist die Realisierung eines Multi-Robot-Systems innerhalb der Omron-Produktfamilie ohne eine SPS nicht möglich. Mit dem Verwenden der dezentralen Steuerung wird die Ansteuerung der Roboter und die Anbindung der Sicherheitseinrichtungen von dieser übernommen. Wie der eAIB Controller verfügt der SmartController EX über ein eV+ Operating System, wodurch eine Programmierung und Einrichtung des Multi-Robot-Systems über eine Ethernetverbindung durch einen Rechner mit ACE-Programmierungsumgebung erfolgt. Die Ansteuerung der Roboter durch den Controller erfolgt über IEEE 1394 (FireWire). Der Sicherheitsschaltkreis wird von der Ansteuerung getrennt über die XUSR-, XSYS- und XFP- Schnittstellen hergestellt. Die Energieversorgung der Roboter ist weiterhin über den jeweiligen eAIB Controller vorzunehmen.

Eine Nutzung der Digital I/ O's direkt an den Robotern ist ebenfalls möglich, kann jedoch auch über den SmartController EX erfolgen. Über die Möglichkeiten des eAIB Controllers hinaus, stellt der SmartController EX diverse serielle Schnittstellen, wie zum Beispiel RS-232, zur Verfügung (vgl. Abbildung 2.7). Wichtig für den Betrieb ist, dass auf der vom Hersteller konfigurierten Memory SD- Karte die verwendeten Roboter hinterlegt sind. Die Abmaße des SmartController EX sind $328,9 \times 189,1 \times 86$ [mm] (Länge x Tiefe x Höhe).

Ergänzende Informationen sind im SmartController EX User's Guide ([7]) nachzulesen.



1	SD Card Slot	10	RS-232 and RS-422 / 485 connectors
2	Top Three Status LEDs	11	DeviceNet connector
3	Bottom Three Status LEDs	12	XDIO connector
4	SW1 DIP switches	13	XUSR connector
5	SmartServo 1.1, 1.2, and 1.3	14	XSYS connector
6	Ethernet connectors	15	XFP connector
7	Fieldbus Module	16	XMCP connector
8	USB port	17	24 VDC connectors / switch
9	RS-232-1 and RS-232-2 connectors	18	Belt Encoder connector

ABBILDUNG 2.7: SmartController EX. (in Anlehnung an [7])

2.4 Motion Control System

Motion Control Systeme kombinieren die Funktionen Ansteuerung und Antrieb innerhalb eines Systems. Motion Control Systeme von Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co.

KG sind hochdynamische Positioniersysteme, welche für Anwendungen innerhalb der Automatisierung sowie Robotik eingesetzt werden.

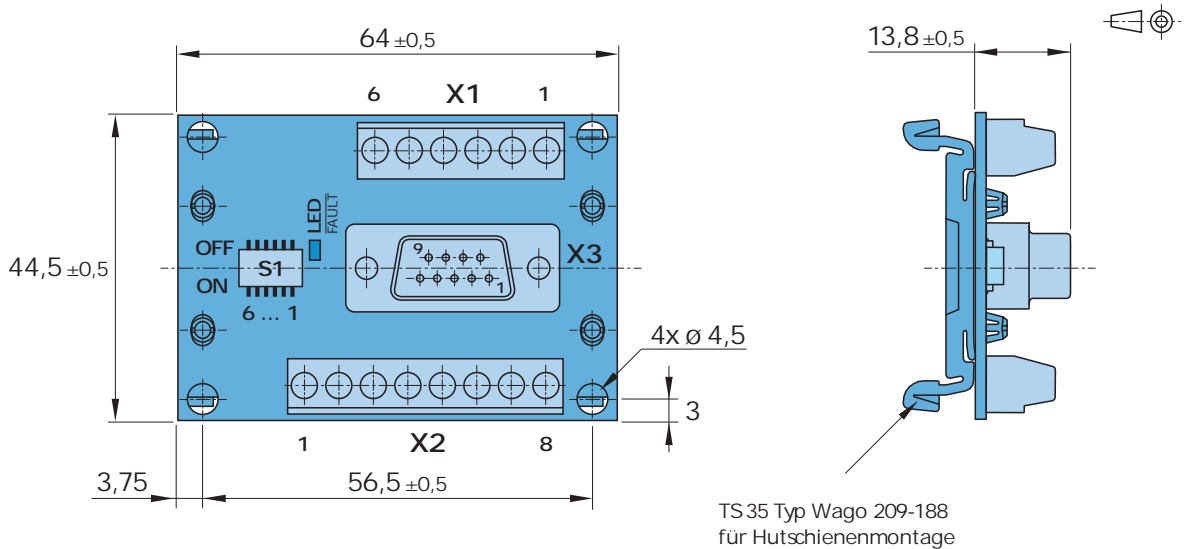


ABBILDUNG 2.8: Maßzeichnung des Programmieradapters 6501.00065.
[8]

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Bürstenloser DC- Servomotor mit integriertem Controller der Generation V2.5 eingesetzt. Durch die integrierte Kombination ist die Steuerung bereits auf den Motor vom Hersteller abgestimmt [9]. Dies vereinfacht die Inbetriebnahme und Installation des Systems. Der Motion Controller 3564K024B CS mit einem Nenndrehmoment von 71 mNm zeichnet sich durch eine kompakte Bauform, Wartungsfreiheit, einen konstanten Gleichlauf und eine hohe Laufruhe aus [10]. Zusätzlich dazu verfügt der Motion Controller über eine RS-232 Schnittstelle, wodurch das Einbinden eines PC's oder einer gängigen Industriesteuerung möglich ist. Für den Anschluss eines Standard RS-232 DB 9 Steckers ist der Motion Controller an den Faulhaber Programmieradapter 6501.00065 anzuschließen (vgl. Abbildung 2.8). An den Programmieradapter wird außerdem die 24 V Spannungsversorgung angeschlossen. Bei Bedarf ist ein Zugang zu dem digitalen Ausgang und zu den 3 digitalen sowie einem analogen Eingang über den Adapter möglich. Über die Schnittstelle kann eine Positions-, Geschwindigkeits- oder Drehmomentenregelung erfolgen, dabei sind Übertragungsraten bis zu 115.000 baud möglich. Mit dem Motion Controller ist eine Drehzahl bis 14000 min^{-1} ansteuerbar. Für den Dauerbetrieb wird eine maximale Drehzahl von 7700 min^{-1} empfohlen. Das Erweitern des Motion Controller um das Planetengetriebe 32/3S mit einer Untersetzung von $14 : 1$ erhöht den Wirkungsgrad und die Leistung des gesamten Antriebsstranges. Das Planetengetriebe ist für einen Dauerbetrieb mit

einer maximalen Drehzahl von 4000 min^{-1} einzusetzen [11]. Die axiale sowie radiale zulässige Wellenbelastung liegt bei $\leq 200 \text{ N}$. Die Kombination aus Motion Controller und Planetengetriebe ist in Abbildung 2.9 dargestellt.

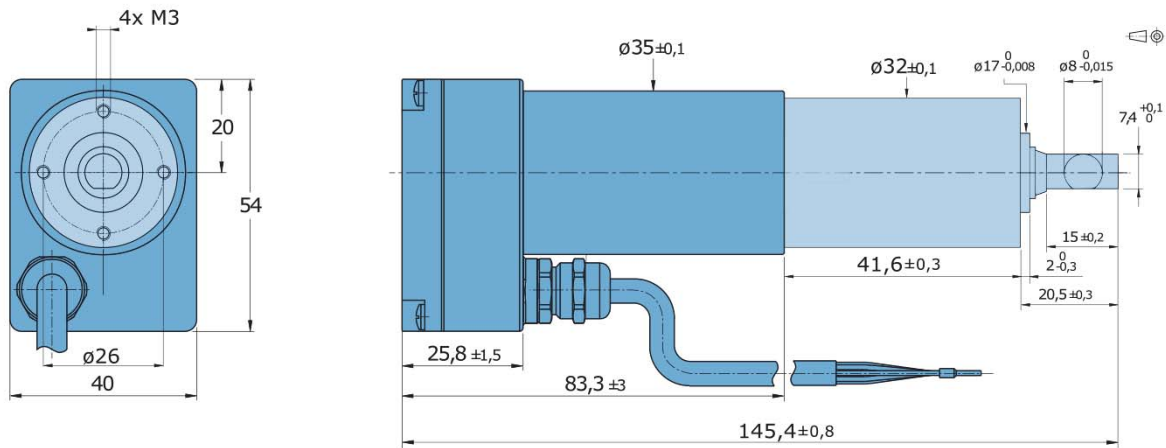


ABBILDUNG 2.9: Maßzeichnung des Motion Control Systems. Dunkelblau Bürstenlose DC- Servomotor mit integriertem Motion Controller 3564K024B CS. Hellblau Planetengetriebe 32/3S Untersetzung 14:1. (in Anlehnung an [10][11])

Auf dem Motion Controller können Anwenderprogramme hinterlegt werden, wodurch sowohl teilweise autonome Abläufe als auch ein Standalone Betrieb möglich ist [10]. Zu den Anwenderprogrammen zählt eine Parameterdatei, in welcher die Einstellungen des Antriebs hinterlegt sind [12]. Im Ablaufprogramm sind die Bewegungs- und Steuerungsbefehle gespeichert. Der Inhalt dieser Dateien kann über den Faulhaber Motion Manager angepasst werden. Der Faulhaber Motion Manager ist eine für diesen Zweck entwickelte frei verfügbare Software- Applikation. In dieser Arbeit wird die neueste Version, Version 6.0, verwendet (vgl. Abbildung 2.10). Das Programmieren erfolgt über einen ASCII- Befehlssatz. Eine Übersicht über alle Befehle ist dem RS-232 Kommunikations-/ Funktionshandbuch von Faulhaber zu entnehmen [12]. Bei Motion Control Systemen mit am Motor integrierter Steuerelektronik ist werksseitig eine geeignete Antriebsfunktion voreingestellt, welche über das Massenträgheitsmoment der Last spezifiziert werden kann. Das Ansteuern des Motors erfolgt in diesem Versuchsaufbau über die RS-232 Schnittstelle. Für eine geeignete Kommunikation außerhalb der Motion Manager Software- Applikation muss die Hostschnittstelle, wie folgend konfiguriert werden:

- gleiche Baudrate
- 8 Bit

- keine Parität
- 1 Stoppbit
- keine Flusststeuerung.

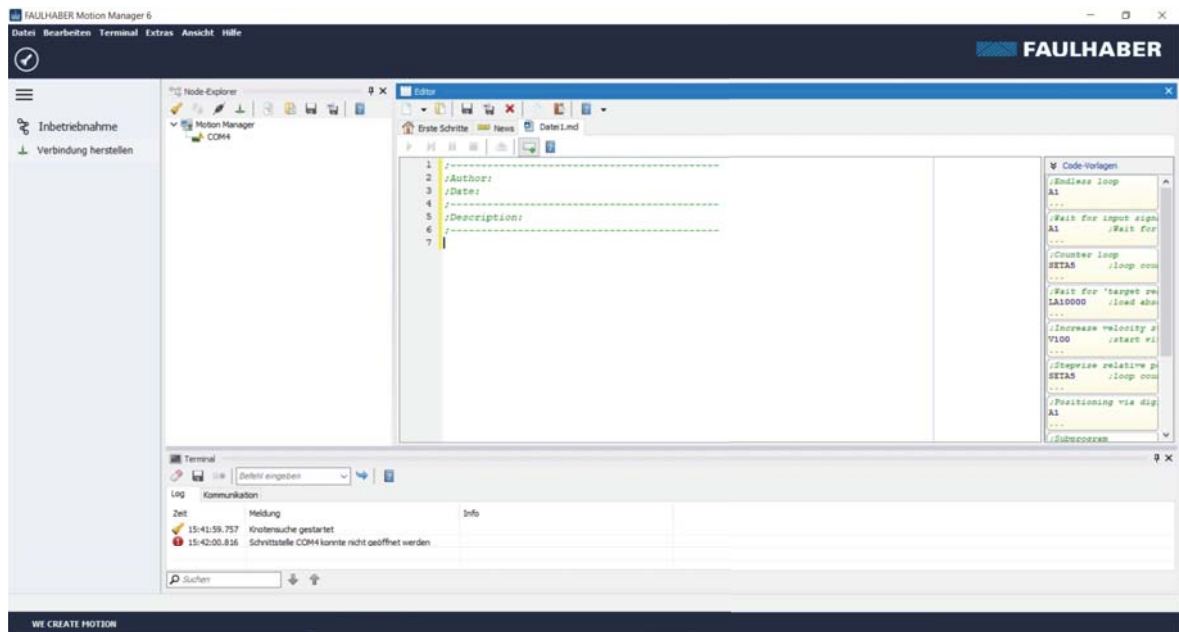


ABBILDUNG 2.10: Übersicht Motion Manager 6 Programmierumgebung.

2.5 ACE- Programmierumgebung

Das Automation Control Environment (ACE) ist eine rechnerbasierte Softwareanwendung von Omron. Über die Software kann das ganze Roboter-, Controller-, Vision- und Zuführsystem des Omron Produktsortiments konfiguriert, programmiert, angesteuert und verwaltet werden [13]. Für den Laborversuch wird die aktuelle Version 4.0 verwendet. Neben dem frei verfügbaren Grundsystem, stellen ACE Sight und ACE PackXpert zusätzliche Softwarefunktionen für Vision- und Verpackungsanwendungen dar, werden jedoch nicht im Rahmen des Laborversuchs verwendet.

Die ACE- Software kann sowohl im Standard- als auch im Emulationsmodus betrieben werden. Im Gegensatz zum Emulationsmodus müssen beim Standardmodus die physikalischen Hardwarekomponenten, wie zum Beispiel die Roboter, mit dem ACE-ausführenden Rechner verbunden sein. Der Emulationsmodus stellt eine virtuelle Umgebung bereit, in der die Hardwarekomponenten simuliert werden können. Obwohl bei beiden Modi die Benutzeroberfläche (vgl. Abbildung 2.11) gleich ist, gibt es kleinere Unterschiede zwischen diesen. Aufgrund der fehlenden Verbindung zur Hardware sind

im Emulationsmodus keine Einstellungen an den Controllern und Robotern möglich [14]. Außerdem besteht eine andere Herangehensweise für das Starten der Roboter und das Verwalten der Digital I/ O's. Zudem ist zu beachten, dass die ermittelten Taktzeiten aus dem Emulationsmodus von den realen Taktzeiten abweichen können. Der Emulationsmodus bietet den Vorteil, dass die programmierten Anwendungen im Vorfeld getestet und gegebenenfalls optimiert werden können, ohne dass sich Fehler in einem physischen Schaden an den Hardwarekomponenten widerspiegeln. Die ACE-Programmierungsumgebung ermöglicht das Entwickeln einer realen und simultanen Steuerung von mehreren Robotern sowie Controllern von einem Rechner aus. Über den, in der Software, integrierten 3D- Visualisierer kann das programmierte Verhalten des Systems nachvollzogen werden. Im Standardmodus steht zusätzlich noch das reale System zur Verfügung. Mit dem V+ Jog Control Menü können die Roboter ohne Programmierung manuell Verfahren werden oder Variablen relativ zu den Robotern definiert werden. Das Verfahren der Roboter wird simultan im 3D- Visualisierer und am realen Robotersystem umgesetzt.

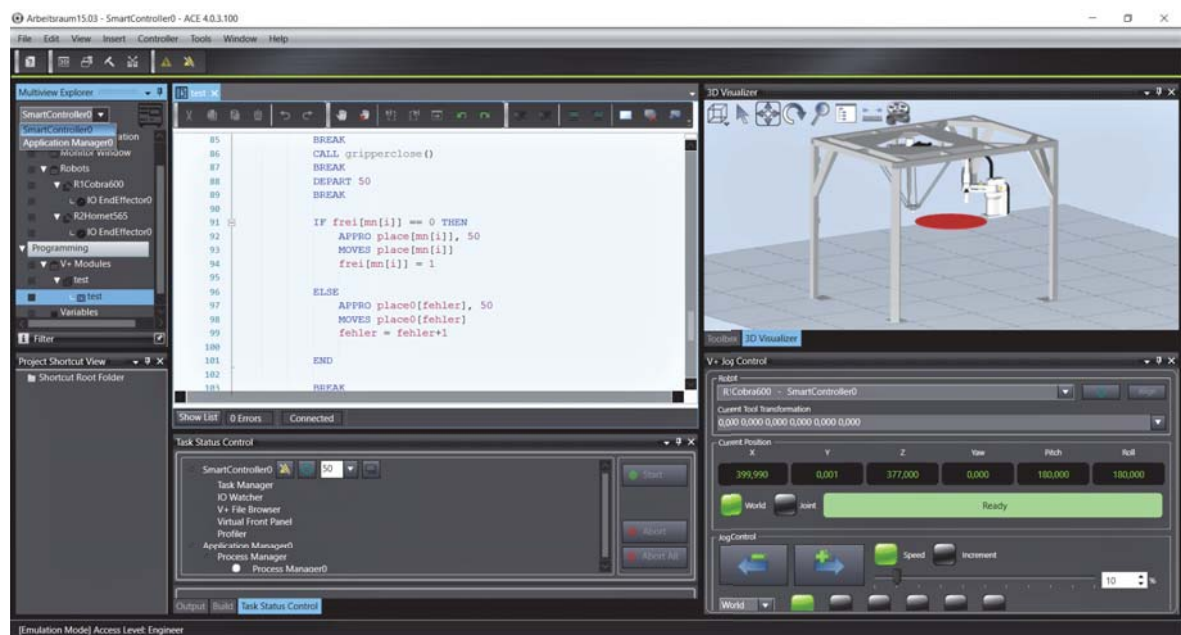


ABBILDUNG 2.11: Übersicht der ACE- Programmierungsumgebung.

Für das Einrichten und Programmieren im Standardmodus muss der verwendete Controller über eine Ethernetverbindung mit dem Rechner verbunden sein. Im Betrieb kann auf diese Verbindung verzichtet werden, sofern das Programm nicht auf die ACE-Funktionalitäten angewiesen ist [13]. Zu den ACE- Funktionalitäten zählen die Anwendungen aus dem Application Manager, wie die 3D- Visualisierung. Die Anwendungen

unter der Rubrik SmartController werden auf dem Controller gespeichert und sind daher ohne entsprechende Verbindung ausführbar, dazu zählt das Ansteuern der Roboter. Mit Hilfe der 3D- Visualisierung können die Roboterzelle inklusive Roboter und andere 3D- Objekte virtuell nachgebaut werden. Das Positionieren erfolgt dabei relativ zum globalen Workspace- Koordinatensystem. Das Robot- World Koordinatensystem ist ein individuelles Koordinatensystem für jeden verwendeten Roboter. Relativ zu diesem Koordinatensystem werden programmierrelevante Punktvariablen für jeden Roboter gesetzt. Die Orientierung aller Koordinatensysteme ist aus dem 3D- Visualisierer entnehmbar.

Das Programmieren der Roboter findet innerhalb der Rubrik SmartController in einer eV+ Umgebung statt. eV+ ist eine speziell für Omron Produkte entwickelte Programmierumgebung sowie -sprache [13]. Der eV+ Language Reference Guide ([15]) gibt Aufschluss über die Programmierbefehle. Der Application Manager bietet zusätzlich noch eine C# Programmierumgebung [16]. Mittels C# können Prozesse im Bereich der Verpackungsanwendungen freigeschaltet oder gesperrt werden und Produktveränderungen im Arbeitsraum vorgenommen werden. eV+ sowie C# Programme können mit Task Status Control ausgeführt werden.

Über den Automotion Control Environment Version 4.0 User's Guide ([13]) sind weitere Informationen und detailliertere Abbildungen der Programmierumgebung einsehbar.

3 Konstruktion des Montagerahmens

Der Montagerahmen stellt im Wesentlichen den Bereich dar, indem sich die Industrieroboterzelle des Laborversuchs befindet. Die Basis für die Konstruktion des Montagerahmens bildet der Konstruktionsentwurf für die Montage des Hornet 565 von Omron und die grundlegenden Anforderungen. Die grundlegenden Anforderungen sind durch die räumlichen Begebenheiten vor Ort, die Herstellerangaben zu den Robotern und anwendungstechnischen Aspekte charakterisiert. Die Aufgabe des Montagerahmens besteht in der Bereitstellung einer Montagemöglichkeit für den Hornet 565.

3.1 Anforderungen an den Montagerahmen

Aufgrund der räumlichen Begebenheiten in dem Laborraum F214 ist die maximale Größe und die Position des Montagerahmens beschränkt. Der Laborversuch wird einen ehemaligen Versuchsaufbau ablösen und sich zwischen der KUKA- Schweißroboterzelle und der Anschlagtür, welche einen Flucht- und Rettungsweg darstellt, positioniert (vgl. Abbildung 3.1). Der ehemalige Versuchsaufbau besteht aus quadratischen Hohlprofilen $40 \times 40 \times 4$ [mm] und hat eine Größe von $2635 \times 1750 \times 2180$ [mm] (Länge \times Tiefe \times Höhe). Da Flucht- und Rettungswege laut Brandschutzverordnung freizuhalten sind und die andere Seite durch die KUKA- Schweißroboterzelle begrenzt ist, beträgt die maximal mögliche Länge des neuen Montagerahmens **2857 mm** [17]. Die Gitterwand zwischen dem neuen Laborversuch und der Schweißroboterzelle ist mit **35 mm** breiten Laschen zu beiden Seiten an der Wand befestigt und ebenfalls zu berücksichtigen. Um weiterhin einen einheitlichen und optisch ästhetischen Gesamteindruck mit der Nachbarzelle zu erzielen, ist die Höhe des Montagerahmens **2180 mm** anzunähern. Die Tiefe des Montagerahmens beträgt mindestens **1750 mm** und sollte nicht weiter als technisch notwendig in den Raum hineinragen. Der Kabelkanal soll weiterhin beibehalten werden, um die Zugänglichkeit zu den Versorgungskabeln für Dritte zu erschweren und die Gefahr zu reduzieren, dass die Roboter sich in den Kabeln verfangen.

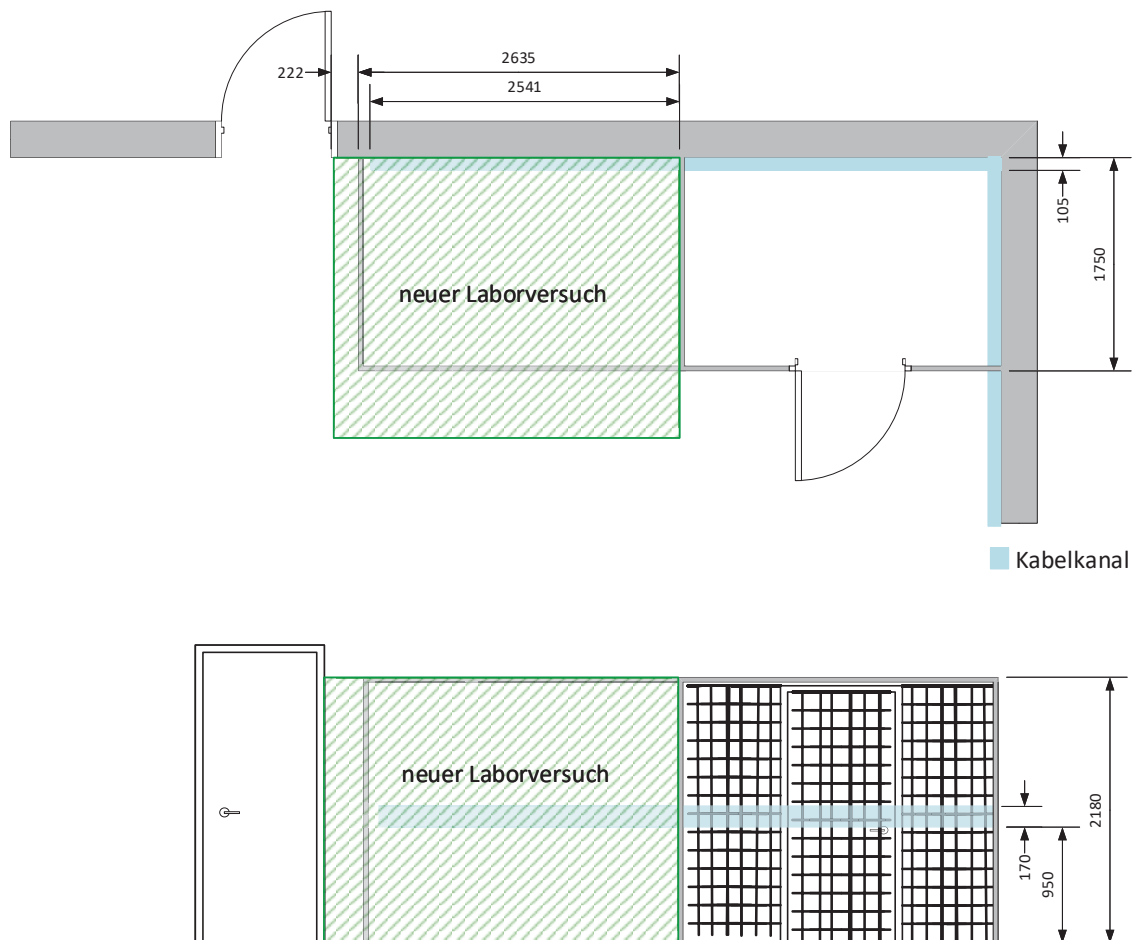


ABBILDUNG 3.1: Grundriss und Aufriss der Laborumgebung.

Um eine hohe Steifigkeit des Montagerahmens zu erzielen, soll dieser weitestgehend geschweißt werden. Der Transport des Montagerahmes vom IWS (Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik), in dem die Schweißarbeiten durchgeführt werden, zum Labor bedingt eine Passage durch Flure, Türen und einen Aufzug. Die kritischen Maße beim Transport befinden sich im Aufzugsbereich, der eine maximale Diagonale, mit entsprechendem Rangierabstand, von **2645 mm** aufweist und eine Türöffnung von **1400 mm** hat. Die Höhe des zu transportierenden Teils ist auf maximal **1940 mm** zu begrenzen, um im Aufzug entsprechend Platz zu haben.

Der Montagerahmen muss ausreichend Platz für die Integration und Montage des Hornet 565 und den eCobra 600 bieten. Der eCobra 600 ist auf einem Montagetisch von **1700 x 1200 x 1021 [mm]** (Länge x Breite x Höhe) befestigt. Die Arbeitsbereiche der

beiden Roboter sollen sich nicht überschneiden. Die untere Begrenzung des Arbeitsraums des eCobra 600 soll mit der unteren Begrenzung des maximalen Arbeitsraumdurchmessers des Hornet 565 übereinstimmen (vgl. Abbildung 2.1 und 2.3). Bei den Arbeitsräumen sind die ausgewählten Greifmechanismen zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 4.1). Um die spätere Programmierung der Roboter zu erleichtern, sollen die Roboterkoordinatensysteme dieselbe Orientierung aufweisen. Ebenfalls zu berücksichtigen sind die konstruktiven sowie installativen Aspekte der Sicherheitslichtschranken und des dazugehörigen Umlenkspiegels (vgl. Kapitel 5).

Der Montagerahmen für den Hornet 565 muss mindestens eine Eigenfrequenz von > 25 Hz für reguläre Anwendungen und bei hochdynamischen Anwendungen unter der vollen Last eine Eigenfrequenz von > 40 Hz aufweisen. Da hochdynamische Anwendungen vorgesehen sind, ist die Eigenfrequenz von > 40 Hz maßgebend. Außerdem muss genügend Platz eingeplant werden, sodass der eAIB des Hornet 565 über die Oberseite des Montagerahmens ausgewechselt werden kann, ohne, dass der Roboter vom Gestell abmontiert werden muss. Ebenfalls zu berücksichtigen ist das Armbewegungsvolumen des eCobra und des Hornets, bei welchem in X- und Y- Richtung ein Richtwert von 1440 mm als Ausgangswert fungiert. Weitergehend wird der Einsatz von ASTM A500 der Güte B oder C von Omron empfohlen [6].

3.2 Analyse des Omron- Konstruktionsentwurfes

Der Konstruktionsentwurf für die Montage des Hornet 565 von Omron ist ein vom Hersteller erstellter Montagerahmen für die Aufnahme *eines* Hornet 565 (vgl. Abbildung 3.2). Der Entwurf und entsprechende Zeichnungen sind dem Hornet 565 User's Guide ([6]) zu entnehmen. Der Montagerahmen ist eine $1300 \times 1300 \times 2235,4$ [mm] (Länge x Tiefe x Höhe) große und 368 kg schwere Stahlkonstruktion aus ASTM A500 Kohlenstoffstahl der Güte B oder C. Die mechanischen Eigenschaften und die chemische Zusammensetzung von ASTM A500 sind vergleichbar mit handelsüblichem Baustahl (vgl. Tabelle 3.1). Der Montagerahmen von Omron ist eine 59-teilige Schweißkonstruktion aus überwiegend quadratischen sowie rechteckigen Hohlprofilen. Das vierbeinige Grundgerüst des Montagerahmens besteht aus vier $80 \times 80 \times 6,3$ [mm] Hohlprofilpfeilern, die horizontal auf zwei Ebenen mit gleichartigen Hohlprofilen verbunden sind. Die eine Ebene befindet sich auf den Pfeilern, die andere im unteren Drittel auf einer Höhe von 817,2 mm. Die untere Ebene bietet neben einer erhöhten Steifigkeit zudem die Möglichkeit Förderbänder oder ähnliches zu installieren. Der Montagerahmen wird mit zwölf M24 Schrauben über Grundplatten am Boden fixiert. Der Übergang zwischen

den Grundplatten und den Pfeilern, sowie der unteren Ebene und den Pfeilern ist mit zusätzlichen dreieckigen Platten verstärkt und führt zu einer sanfteren Umleitung des Kraftflusses.

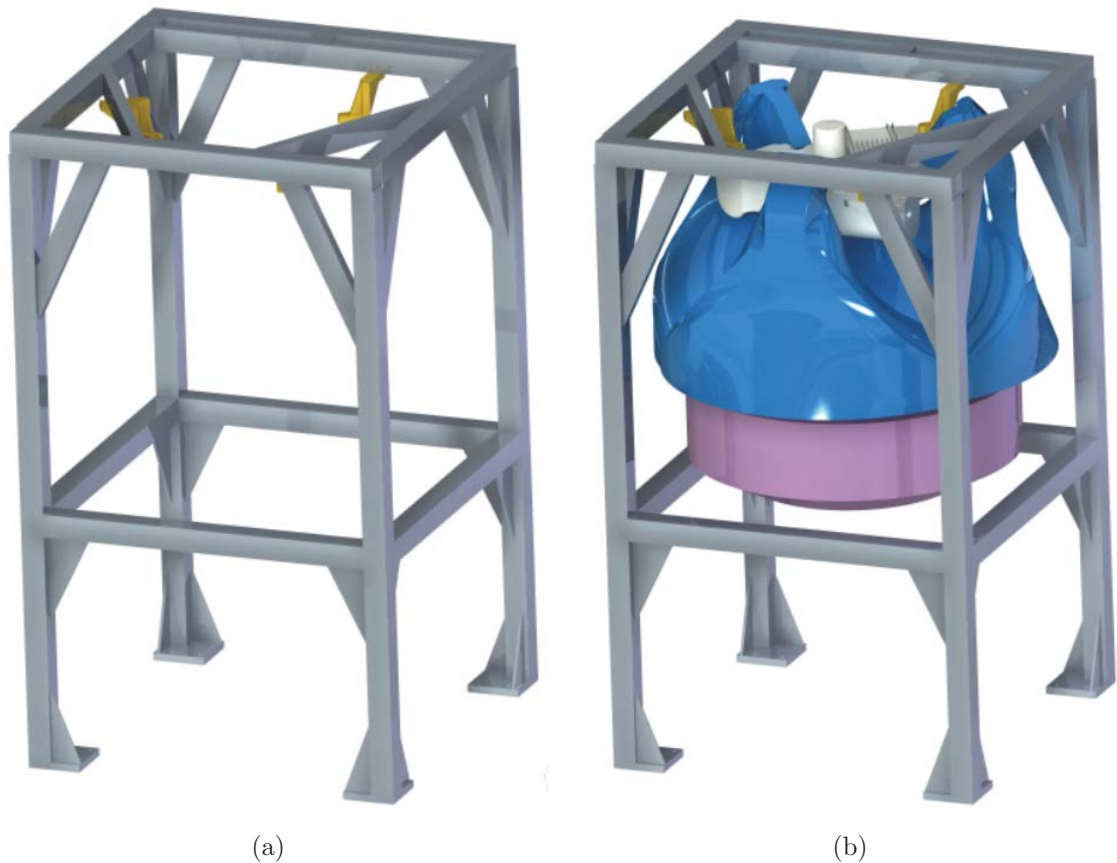


ABBILDUNG 3.2: Konstruktionsentwurf von Omron. (a) ohne Hornet 565. (b) mit Hornet 565. Blau: Armbewegungsvolumen. Rosa: Arbeitsraum.

Da das Gestell nur am Boden fixiert wird und somit im oberen Bereich, indem die Schwingungen der Roboterbewegung übertragen werden, keine äußeren Einschränkungen der Freiheitsgrade besitzt, ist hier eine zusätzliche Versteifung durch rechteckige Hohlprofilstreben der Größe $80 \times 40 \times 4$ [mm] vorzufinden. Die zusätzlichen Streben führen zu einer sanfteren Überleitung des Kraftflusses in den Pfeiler und einer Entlastung des Pfeilers im obersten Abschnitt. Durch den Einsatz der Streben werden biegesteife Ecken ausgebildet. Im Inneren der oberen Ebene sind noch drei $80 \times 40 \times 4$ [mm] Rechteckhohlprofile verschweißt, welche über eine 40×43 [mm] große Kontaktfläche die Befestigungsmöglichkeit für die eigentliche Aufnahme des Hornet 565 darstellen. Die drei Aufnahmen bestehen jeweils aus fünf kleinen Stahlteilen. Auch hier führen die dreieckigen Platten zu einer sanften Umleitung des Kraftflusses, einer Versteifung der

Konstruktion und einer besseren Verteilung der Last, welche aus der Gewichtskraft des Hornet 565 resultiert. Durch die Befestigung der Aufnahme an den Rechteckhohlprofilen verkürzt sich der Hebelarm und verringert somit das entstehende Moment.

Im Allgemeinen bietet der Montagerahmen von Omron durch die Wahl von eckigen Profilen die Möglichkeit mehrere gleichartige Gestelle nebeneinander zu stellen und diese auch bündig an der Wand zu platzieren. Die Kanten der Profile sind abgerundet und stellen daher keine Verletzungsgefahr dar. Der Arbeitsbereich des Hornet 565 befindet sich innerhalb des Montagerahmens. Das Armbewegungsvolumen reicht jedoch über die Grundfläche des Gestells hinaus, übersteigt in der Höhe aber nicht den Montagerahmen (vgl. Abbildung 3.3). Eine Installation von Schutzeinrichtungen wurde bei diesem Montagerahmen nicht berücksichtigt.

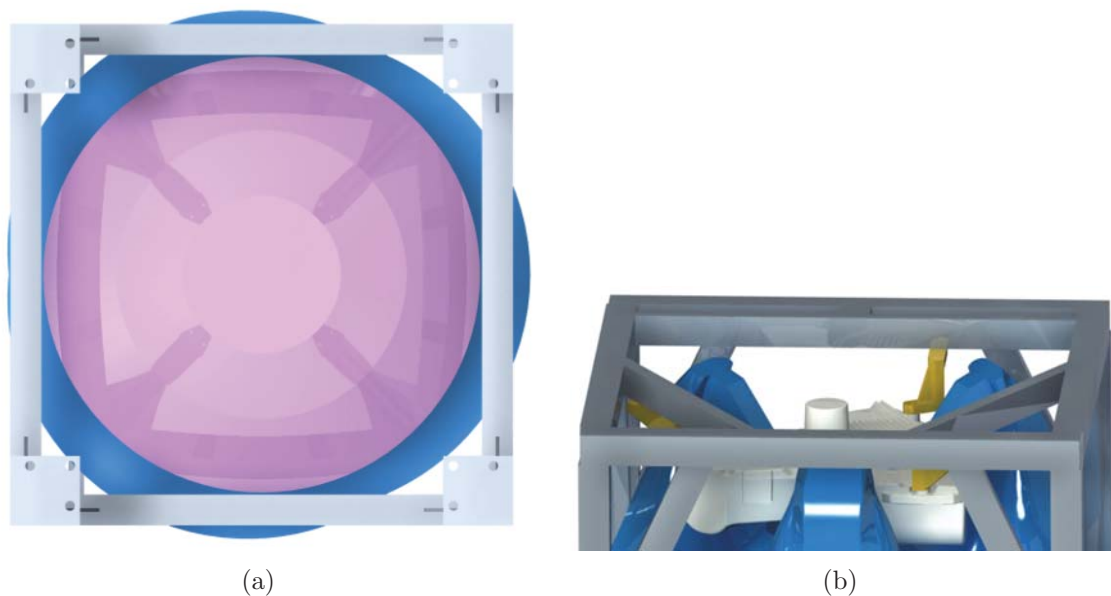


ABBILDUNG 3.3: Konstruktionsentwurf von Omron. (a) Unteransicht. (b) Detailansicht Roboteraufnahme. Blau: Armbewegungsvolumen. Rosa: Arbeitsraum.

Bedingt durch die hohe Anzahl an Einzelteilen führt der Bau des Montagerahmens zu einem hohen Schweißaufwand. Insbesondere im Bereich der Aufnahmen birgt der vielfache Wärmeeintrag das Risiko auf Verzug und damit einhergehend ein Nichteinhalten der Toleranzen. Die Teile der Aufnahmen stellen außerdem einen hohen Fertigungsaufwand durch ihre unterschiedlichen Abmessungen dar. Des Weiteren konzentriert sich die Kraftübertragung von den Aufnahmen zu den Rechteckhohlprofilen auf die drei $40 \times 43 \text{ [mm]}$ großen Kontaktflächen, welche im Vergleich zu dem massiven Gestell am höchsten statisch belastet sind und auch im Sinne der Schwingungresistenz am anfälligsten sind. Die Belastung der Aufnahmen wird zusätzlich durch das Absenken des

Hornet 565 um 135,7 mm und dem daraus resultierenden Hebelarm unterstützt. Der Rahmen liegt innerhalb der 25 Hz Spezifikation. Die Konstruktion ist daher nur für reguläre Anwendungen ausgelegt [6].

3.3 Entwicklung des Montagerahmens

Für den neuen Laborversuch ist eine Neukonstruktion des Montagerahmens notwendig. Der alte Laborversuch kann nicht verwendet werden, da dieser zu anfällig für Schwingungen ist und ein Ausbau des Versuchs unverhältnismäßig. Der Konstruktionsentwurf von Omron entspricht ebenfalls nicht den Anforderungskriterien. Aufgrund des geringen Bauraums passt nur der Hornet 565 hinein. Ein Verwenden des Konstruktionsentwurfes nur für den Hornet beschränkt die Möglichkeiten des verfügbaren Bauraums für die Übergabestation. Um den Liefer- und Fertigungsaufwand für die Neukonstruktion des Montagerahmens gering zu halten, gilt es teilsarm zu konstruieren. Der Montagerahmen besteht vorrangig aus Normteilen oder Teilen mit einfacher Geometrie.

Der neue Montagerahmen ist $2645 \times 1940 \times 2184$ [mm] (Länge x Tiefe x Höhe) groß und wiegt 677 kg (vgl. Abbildung 3.4 und 3.5). Durch die Befestigungslaschen der Gitterwand der Kuka-Schweißroboterzelle zum neuen Laborversuch hin, wird der Montagerahmen in einem Abstand von 35 mm von dieser Gitterwand aufgestellt. Die räumlichen Einschränkungen beim Transport des Montagerahmens führen zum Unterteilen der Gesamtkonstruktion in sechs Baugruppen mit einer endgültigen Montage im Laborraum F214. Zu diesen sechs Baugruppen gehören vier Profilpfeiler, ein Profiltragwerk und eine Montageplatte mit Zylindern für die Montage des Hornet (vgl. Abschnitt A.1). Entsprechend der Zeichnungen werden alle Teile dieser Baugruppen in sich selbst vollverschweißt. Untereinander werden die Baugruppen mittels Schraubverbindungen zusammengehalten. Der Grundaufbau des Montagerahmens besteht hauptsächlich aus quadratischen $80 \times 80 \times 8$ [mm] Hohlprofilen. Die Profile weisen eine höhere Wanddicke als die Profile im Konstruktionsentwurf von Omron auf, um der höheren Schwingungsanfälligkeit infolge der größeren Abmessungen entgegenzuwirken. Darüber hinaus besitzen die Hohlprofile nach EN 10210 allesamt verrundete Kanten. Entgegen der Herstelleranforderung wird, aufgrund der schlechten Lieferbarkeit im europäischen Raum, kein ASTM A500 für das Bauvorhaben verwendet. Die mechanischen Eigenschaften sind vergleichbar mit handelsüblichem Stahl, daher wird vorrangig S335JR eingesetzt. S335JR entspricht den Mindestanforderungen an ASTM A500 der Güte B oder C (vgl. Tabelle 3.1). Vereinzelt bestehen auch hier Probleme mit der Lieferbarkeit, wodurch in diesem Fall auf S335J2 oder S235JR zurückgegriffen wird (vgl. Abbildung A.1). Die

verwendeten Materialien weisen einzeln und untereinander eine gute Schweißbarkeit auf.

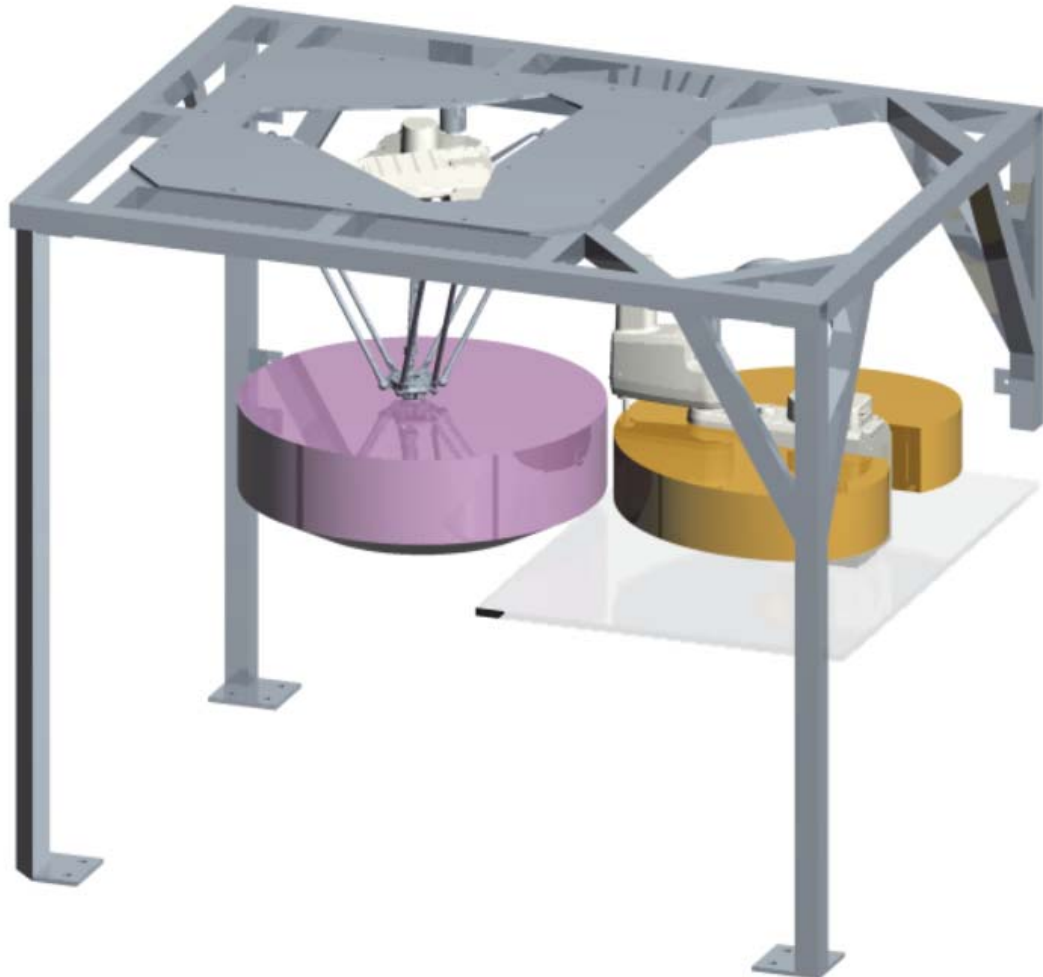


ABBILDUNG 3.4: Hornet 565 und eCobra 600 im Montagerahmen mit Arbeitsräumen. Rosa: Arbeitsraum Hornet. Gelb: Arbeitsraum eCobra. Transparent: Montagetischplatte.

	min. Zugfestigkeit	min. Streckgrenze
ASTM A500 B	400	290
ASTM A500 C	427	317
S235JR	360	235
S335JR	470	355
S335J2	470	355

TABELLE 3.1: Mechanische Eigenschaften von Kohlenstoffstahl im Vergleich (in Anlehnung an [18][19])

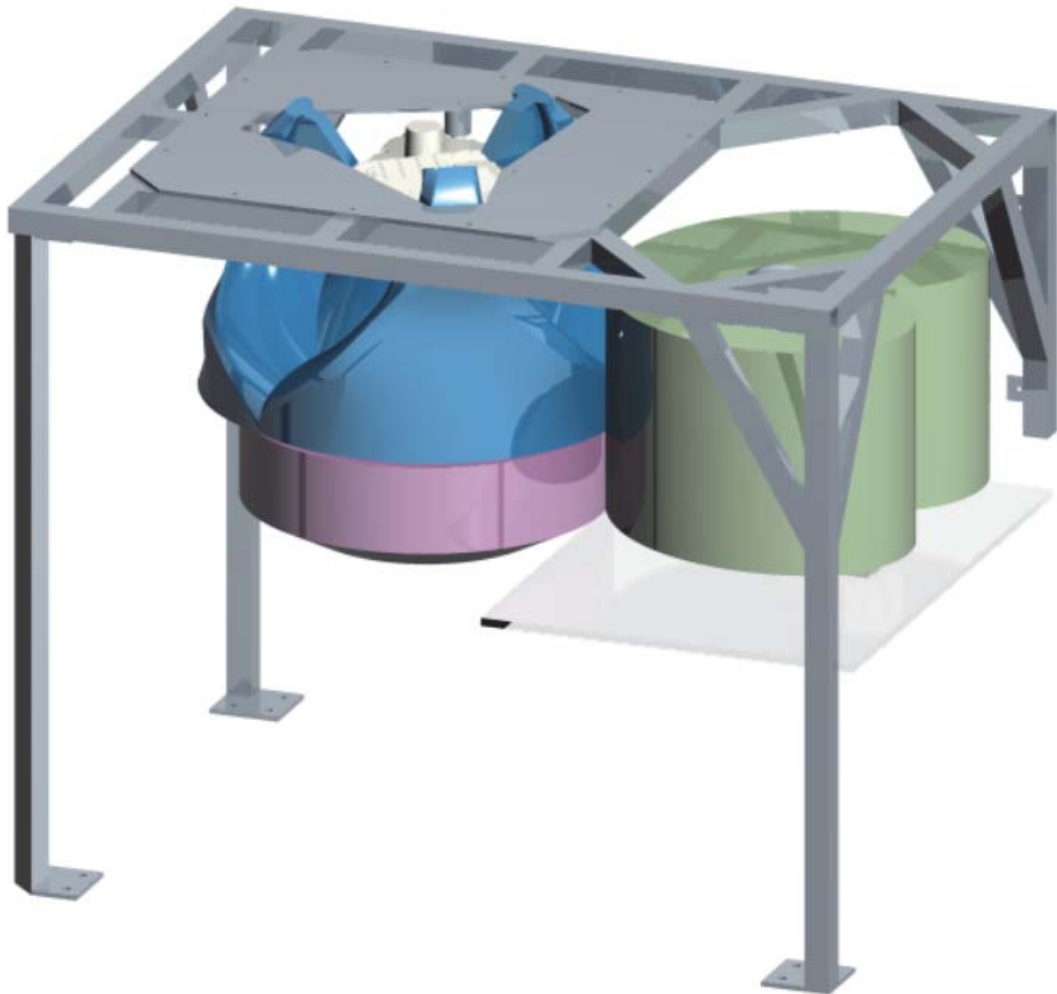


ABBILDUNG 3.5: Hornet 565 und eCobra 600 im Montagerahmen mit Bewegungs- und Arbeitsräumen. Blau: Armbewegungsvolumen Hornet. Rosa: Arbeitsraum Hornet. Grün: Armbewegungsvolumen eCobra. Transparent: Montagetischplatte.

Durch Beibehalten des Kabelkanals muss der Pfeiler angrenzend zur Schweißroboterzelle verkürzt sein. Mit **940 mm** Länge schließt der Pfeiler bündig an der Unterseite mit dem nebenstehenden Pfeiler der Schweißroboterzelle oberhalb des Kabelkanals ab. Der Profilpfeiler ist zusätzlich mit zwei Hohlprofilstreben verstärkt, welche zusammen eine biegesteife Ecke zwischen der Wand und der angrenzenden Zelle bilden. Die Streben ermöglichen einen sanften Kraftfluss und Einleiten der Kraft in den Pfeiler, zudem führen sie zu einer Versteifung des Gesamtsystems. An der Oberseite sind die drei Profile jeweils mit einer Anschlussplatte versehen, mit denen die Schraubverbindung zum Profiltragwerk hergestellt ist. Zum Einleiten der auftretenden Kräfte in die Wand und einem Abstützen des Pfeilers an dieser, befinden sich zwei Anschraubplatten am Pfeiler.

Die Anschraubplatten befinden sich auf der, von der Schweißroboterzelle abgewandten, Seite, sodass kein zusätzlicher Abstand zwischen den Zellen zu berücksichtigen ist. Die Anschraubplatten sind im oberen sowie unteren Bereich des Pfeilers angeschweißt und reduzieren die Freiheitsgrade des Pfeilers.

Die Baugruppen Pfeiler Links und Rechts ähneln im Aufbau dem verkürzten Pfeiler. Im Unterschied zum verkürzten Pfeiler reichen diese beiden jedoch bis zum Boden und können mit Hilfe einer Grundplatte am Boden über jeweils drei Schrauben fixiert werden. Die Grundplatte ist mit 200×200 [mm] Grundfläche größer als der Profilquerschnitt dimensioniert, um einerseits entsprechenden Platz für die Bohrlöcher zu gewährleisten und andererseits die Flächenlast auf den Untergrund besser zu verteilen und einen sicheren Stand zu ermöglichen. Wie in dem Konstruktionsentwurf von Omron schließen die Grundplatten mit den Profilen nach außen bündig ab. Auf zusätzliche Dreiecke im Fußbereich wird zugunsten eines geringen Teileaufwands und einer Minimierung der Stolpergefahr verzichtet. Der Pfeiler Links besitzt zwei Anschraubplatten zur Wand hin, mit welchen die Freiheitsgrade der Konstruktion eingeschränkt werden und somit die Eigenfrequenz erhöht wird. Der Pfeiler Rechts hat aufgrund seiner Position im Raum keine zusätzlichen Anschraubplatten. Die, an den Laborraum grenzenden, Streben der beiden Pfeiler sind rechteckige $80 \times 40 \times 8$ [mm] Hohlprofile, welche bündig mit der Außenseite verschweißt sind. Das Reduzieren der Profilstrebenbreite an diesen Stellen ist notwendig, um den in Kapitel 5 beschlossenen Einsatz von Sicherheitslichtschranken konstruktiv zu berücksichtigen. Die Lichtschranken haben eine Breite von $32,3$ mm und passen somit auf die bereitgestellte Fläche auch unter hinzukommen einer Schweißnaht [20]. Das Befestigen der Lichtschranken erfolgt über Winkel. Neben der Sender- und Empfängereinheit muss auch der dazugehörige Umlenkspiegel im Montagerahmen berücksichtigt werden. Der Umlenkspiegel muss in einem 45° Neigungswinkel zu den Strahlen stehen. Um den Umlenkspiegel besser in den Montagerahmen integrieren zu können, wird für den verbleibenden Pfeiler ein UPE- Profil anstelle des quadratischen Hohlprofils verwendet. Durch die Wahl eines UPE 120 Profils mit einem inneren Abstand der parallelen Seitenflächen von 104 mm besteht ausreichend Platz für die Integration des 89 mm breiten Umlenkspiegels parallel zur Pfeilerrückwand. Die Winkelbedingung des Spiegels führt dazu, dass der UPE- Pfeiler ebenfalls um 45° verdreht steht. Das Einbinden des Umlenkspiegels in die Pfeilergeometrie schützt diesen rückseitig vor mechanischen Einwirkungen. Die Grundplatte schließt bündig mit der Rückseite des UPE- Profils ab, um die Stolpergefahr zu vermindern. Über die Anschlussplatte oben auf dem Profil wird dieses mit dem Profiltragwerk verbunden. Es sind keine zusätzlichen Streben an dem Pfeiler wiederzufinden, um einen maximal

möglichen Blick auf die Roboter freizugeben.

Das Profiltragwerk verbindet die einzelnen Pfeiler untereinander, hält den Montagerahmen zusammen und gibt dem Montagerahmen seine Steifigkeit. Das Profiltragwerk wird über entsprechende Gewinde und die Anschlussplatten oben auf die Pfeiler geschraubt. Im Gegensatz zum Konstruktionsentwurf von Omron gibt es keine zweite Profilebene, die den Montagerahmen versteift. Dies ist notwendig um alle hinzukommenden Integrationen, wie zum Beispiel den Montagetisch mit dem eCobra oder die Sicherheitslichtschranken, innerhalb des Montagerahmens zu plazieren. Die Anordnung der beiden Roboter innerhalb des Montagerahmens ist maßgebend für den Aufbau des Profiltragwerks. Beide Roboter sind entsprechend der Abbildung 3.6 angeordnet. Angrenzend zum Türbereich ist der Hornet positioniert, der eCobra befindet sich rücklings neben der Schweißroboterzelle, wodurch der bereitstehende Platz bestmöglich ausgenutzt wird. Durch die Anordnung in dieser Art und Weise befindet sich der Hornet, als Neuanschaffung, im Fokus des Betrachters, versperrt jedoch aus keinem Blickwinkel den eCobra. Beide Roboter und deren Statusdisplays sind gut von der Seite angrenzend zur Anschlagtür einsehbar. Durch das Drehen des eCobras sind die Anschlüsse des eAIB Controllers trotz guter Erreichbarkeit versteckt und die Orientierung der Koordinatensysteme gleich. Die beiden Roboter stehen fluchtend zueinander, was das spätere Programmieren erleichtert. In Abbildung 3.6 sind die Mindestsicherheitsabstände durch die Sicherheitslichtschranken entsprechend Kapitel 5 berücksichtigt. Zur Wand hin haben beide Roboter einen Mindestabstand von **292 mm**, zur Lichtschranke mindestens **214 mm**. Der Montagetisch mit dem eCobra steht direkt an der Gitterwand zur Schweißroboterzelle, um einen maximalen Abstand zwischen Hornet und eCobra zu schaffen. Zwischen den beiden Arbeitsräumen besteht ein Abstand von **101 mm**. Durch die begrenzte Länge von **2645 mm**, infolge des Transports, überschneiden sich jedoch die Armbewegungsräume. Diese Überschneidung muss bei der Programmierung entsprechend berücksichtigt werden. Das Profiltragwerk hat im Inneren eine Rechteckgeometrie zur Auflage der Montageplatte. In dieser Rechteckgeometrie ist keine weitere Verstrebung vorhanden, um genügend Platz für das Armbewegungsvolumen des Hornets bereitzustellen. Nach Außen ist die Rechteckgeometrie mit der äußeren Kontur des Profiltragwerks verschweißt. Für eine höhere Versteifung sind zusätzliche Profile in das Profiltragwerk eingearbeitet. Mit den beiden Anschraubplatten werden die Freiheitsgrade der Konstruktion weiter eingeschränkt und der verkürzte Pfeiler abgestützt. Die Montageplatte liegt auf dem Profiltragwerk auf und wird über die Schraubverbindungen fixiert und zentriert. Innerhalb der **12 mm** dicken Stahlplatte ist eine Aussparung, resultierend aus dem Armbewegungsvolumen des Hornet 565. Die Aussparung

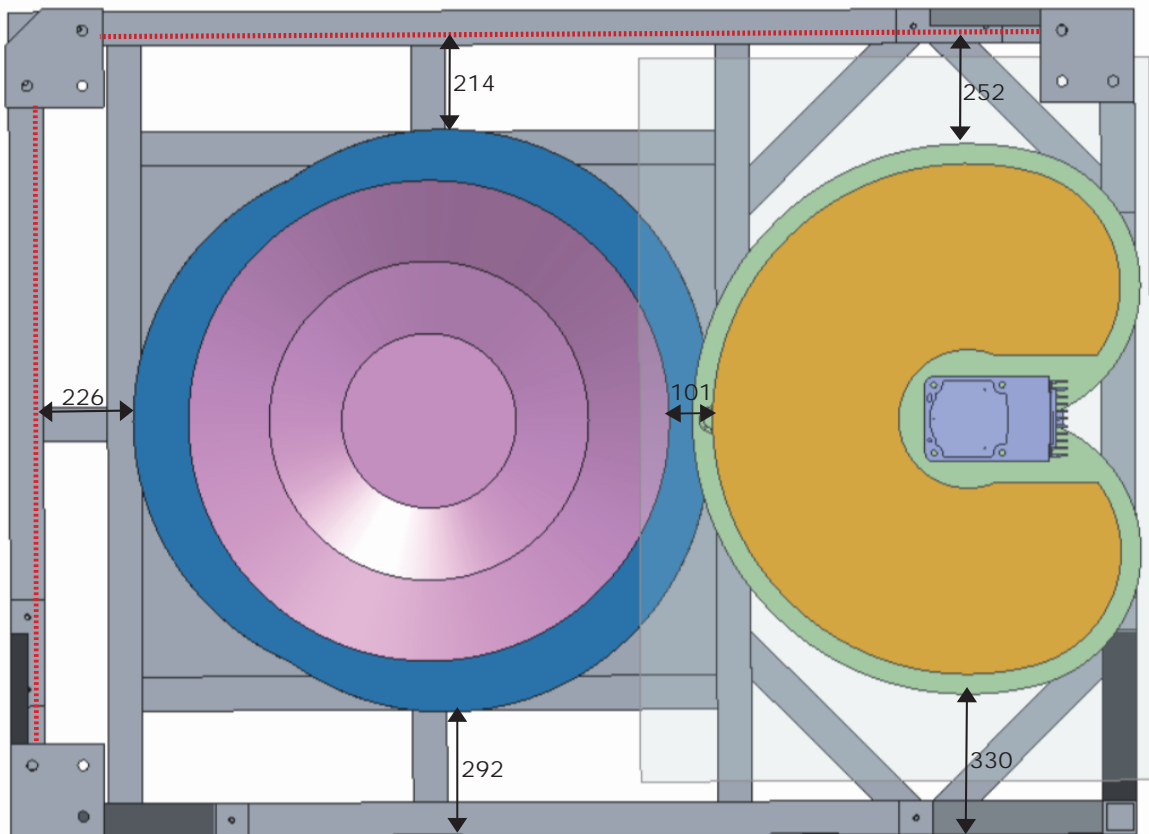


ABBILDUNG 3.6: Ansicht von Unten: Positionierung vom Hornet 565 und eCobra 600 im Montagerahmen. Blau: Armbewegungsvolumen Hornet. Rosa: Arbeitsraum Hornet. Grün: Armbewegungsvolumen eCobra. Gelb: Arbeitsraum eCobra. Transparent: Montageplatte. Rot: Strahlengeometrie Lichtschranke.

basiert auf Konstruktionszeichnungen aus dem Hornet 565 User's Guide, ist jedoch leicht vergrößert, um mehr Abstand zwischen der Platte und den bewegenden Armen zu schaffen [6]. Für das Angleichen der Arbeitsraumgrenzen unter Berücksichtigung der Greifmechanismen (vgl. Kapitel 4.1) muss der Hornet um **80 mm** abgesenkt werden. Der Abstand wird mittels dreier Zylinder realisiert. Die Zylinder haben einen Durchmesser von **80 mm** und stellen somit eine stabile Montagegrundlage dar. Der Zylinderdurchmesser gibt den Radius der Aussparung an dieser Stelle vor, wodurch ein einheitliches Gesamtbild entsteht. Der Vorteil dieser Montagevariante gegenüber der Omronvariante basiert auf der hohen Masse der Montageplatte von **137,5 kg**. Die Montageplatte ist somit sehr viel schwieriger anzuregen. Außerdem ist das Einhalten der Toleranzen einfacher und der Fertigungsaufwand reduziert. Um den Montagerahmen vor Korrosion zu schützen, ist der Montagerahmen mit einem Rostschutzlack versehen. Mit dem matt-schwarzen Lackanstrich passt sich der Rahmen seiner Umgebung an.

Durch die matte Oberfläche gibt es keine störenden Reflexionen, die von den Lichtschranken erfasst werden können.

3.4 Berechnung des Montagerahmens

Um die Festigkeit und Steifigkeit des entwickelten Montagerahmens zu beurteilen, werden Berechnungen zur Eigenfrequenz, Spannung und Auslenkung durchgeführt. Die FE- Berechnungen erfolgen mit ANSYS Workbench 19.0. Die Eigenfrequenz als maßgebendes Kriterium wird über die Modalanalyse bestimmt. Mit der statisch- mechanischen Analyse werden die zu erwartenden Spannungen berechnet. Für die Spannung wird die Vergleichspannung nach „von Mises“ verwendet. Um den Aufbereitungsaufwand für ein lauffähiges Modell zu reduzieren, wird für beide Berechnungsarten das gleiche Grundmodell angewendet. Für die Modalanalyse ist es nicht empfehlenswert mit Schalen- und Balkenelementen zu rechnen, da die Freiheitsgrade einen signifikanten Einfluss auf die Berechnung haben können. Das Grundmodell ist daher als Volumenmodell aufgebaut. Die CAD- Daten aus der Konstruktion des Montagerahmens werden für die Berechnung nach ANSYS importiert. Durch Reduktion des Detailgrades wird der Rechenaufwand verringert. Kleine Geometrien, wie Schrauben, Bohrlöcher, Ver rundungen, Schweißnähte oder die Anschlussplatten zwischen den Baugruppen werden vernachlässigt. Die drei zylindrischen Aufnahmepunkte für den Hornet sind untereinander mit starren Verbindungselementen verbunden. Diese dienen dazu, den Einfluss des Hornets auf die Steifigkeit zu berücksichtigen. Zur qualitativen Überprüfung der Vernetzung und der Ergebnisse wird ein Konvergenzkriterium verwendet. Ab einer Änderungsrate von $< 1\%$ gilt das Ergebnis und somit die Vernetzung als ausreichend genau.

Für den Montagerahmen ergibt sich eine erste Eigenfrequenz von $40,77\text{ Hz}$ (vgl. Abbildung 3.7). Der Rahmen erfüllt damit das Frequenzkriterium nach $> 40\text{ Hz}$ aus den Anforderungen. Die berechneten Spannungen nach „von Mises“ ergeben eine maximale Spannung von $50,147\text{ N mm}^{-2}$ (vgl. Abbildung 3.8). Die maximale Spannung tritt an den Anschraubplatten mit der Positionsnummer 6 auf. Im Bereich der Montageplatte sind Spannungen von ca. 5 N mm^{-2} zu erwarten. Hier wird die höchste Auslenkung von $0,3\text{ mm}$ verzeichnet (vgl. Abbildung 3.9). Die auftretenden Spannungen liegen unterhalb der zulässigen Spannungen für die verwendeten Materialien.

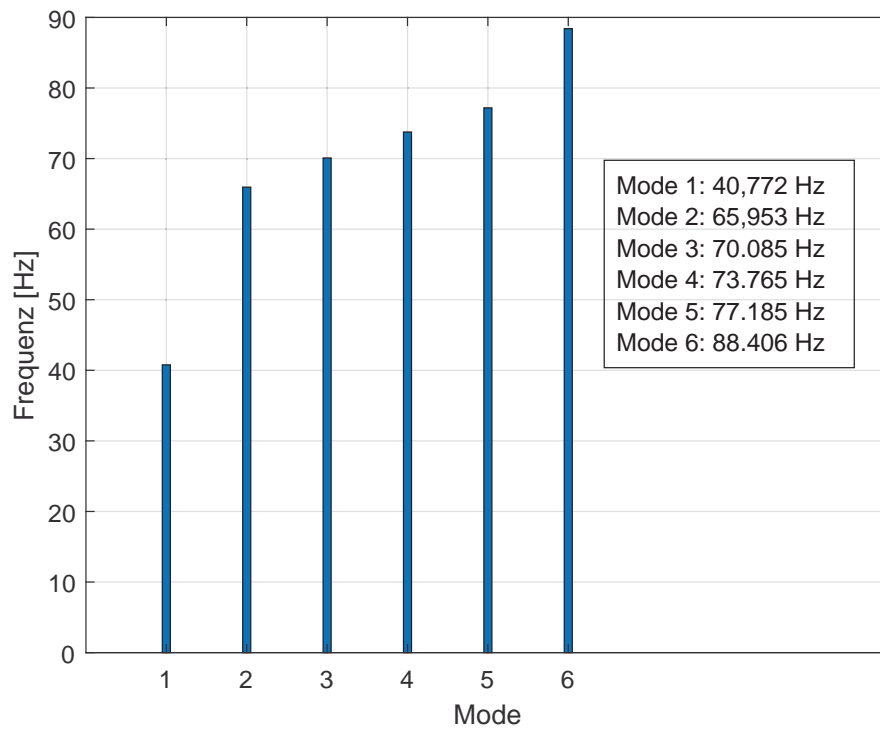


ABBILDUNG 3.7: Berechnete Eigenfrequenzen am Montagerahmen.

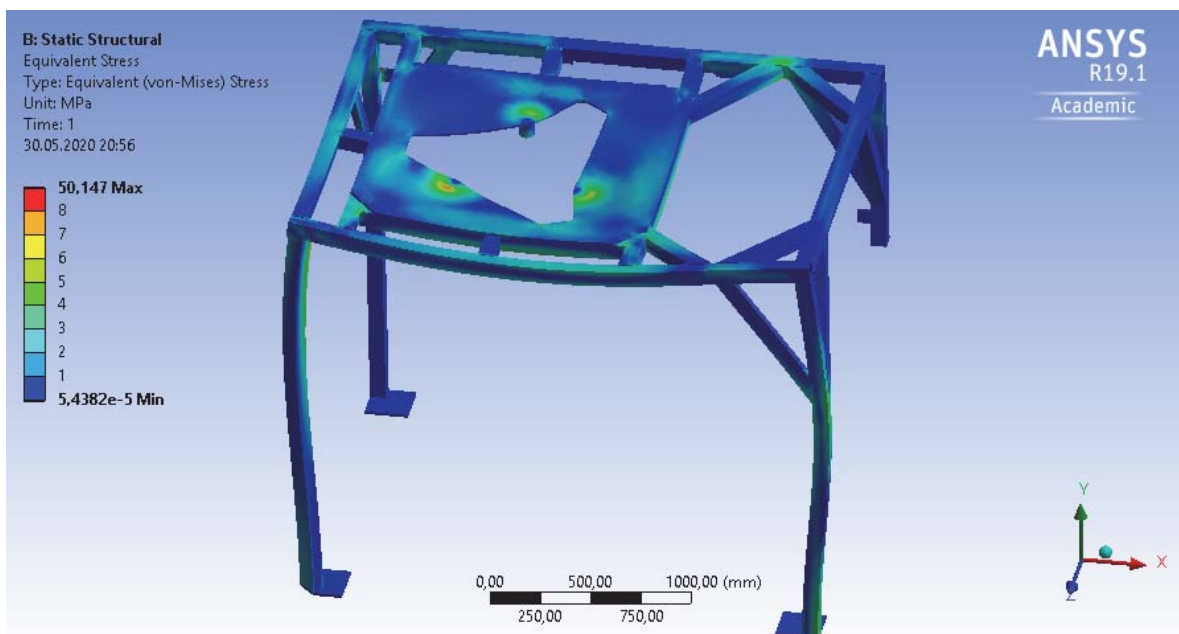


ABBILDUNG 3.8: Berechnete Vergleichsspannung nach „von Mises“ am Montagerahmen.

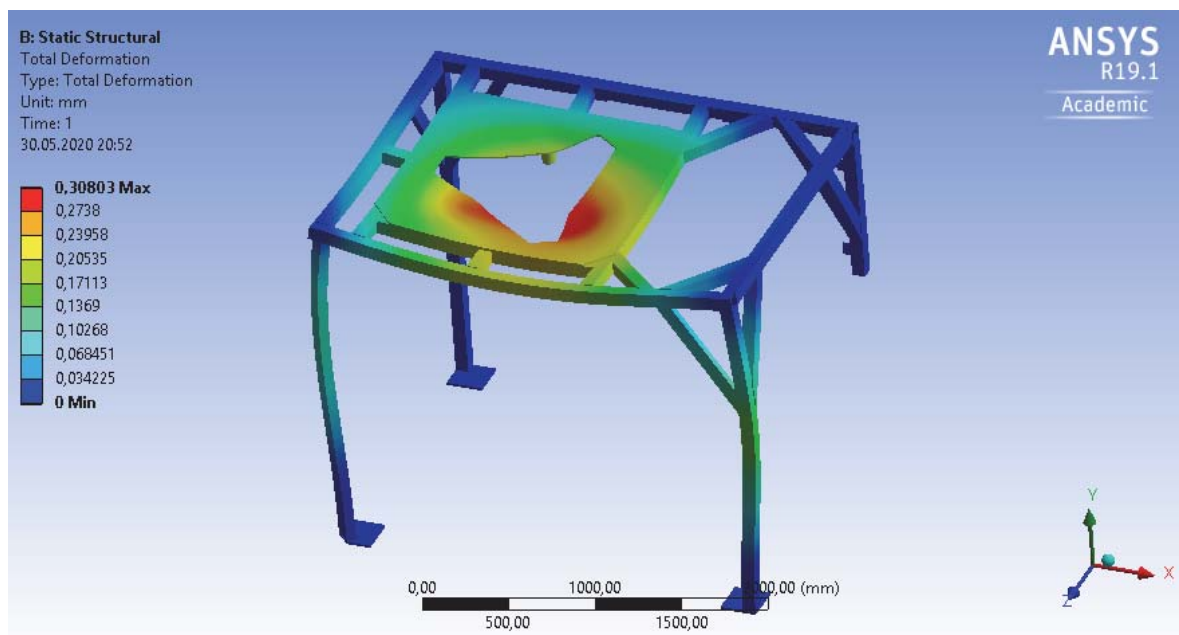


ABBILDUNG 3.9: Berechnete Auslenkung am Montagerahmen.

3.5 Verifikation des berechneten Montagerahmens

Zur Verifikation der berechneten Eigenfrequenz am Montagerahmen wird für diesen eine Vergleichsmessung durchgeführt. Mit der Messung soll die Erfüllung des Frequenzkriteriums erneut bestätigt werden.

Die Frequenzmessungen am Montagerahmen werden mit einem Messsystem von Brüel & Kjær durchgeführt. Das Messsystem besteht aus einem 12-Kanal High Density Eingangsmodule, an welchem sieben 1D-Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer und ein Schlaghammer angeschlossen sind (vgl. Tabelle A.1). Die Beschleunigungsaufnehmer sind auf der Montageplatte willkürlich befestigt. Die Anregung mit dem Schlaghammer findet ebenfalls an der Montageplatte statt. Das Messen an der Montageplatte ist ausreichend, da diese mit dem restlichen Montagerahmen verbunden ist und die Anregung durch den Hornet an dieser Stelle direkt erfolgt. Um das Anregen und Messen an Knotenpunkten zu verhindern, sind Probemessungen erfolgt.

Abbildung 3.10 zeigt die Messung des Beschleunigungsaufnehmers 31582. Die Messung der anderen Beschleunigungsaufnehmer ist vergleichbar mit dieser. Die gemessene erste Eigenfrequenz am Montagerahmen beträgt 29,5 Hz. Es besteht eine Abweichung von 27,6 % zur Berechnung. Das geforderte Frequenzkriterium nach > 40 Hz kann nicht

erneut bestätigt werden. Mit einer Eigenfrequenz von 29,5 Hz erfüllt der Montagerahmen jedoch das Mindestfrequenzkriterium von > 25 Hz. Der Montagerahmen ist für reguläre Anwendungen mit dem Hornet ausreichend dimensioniert.

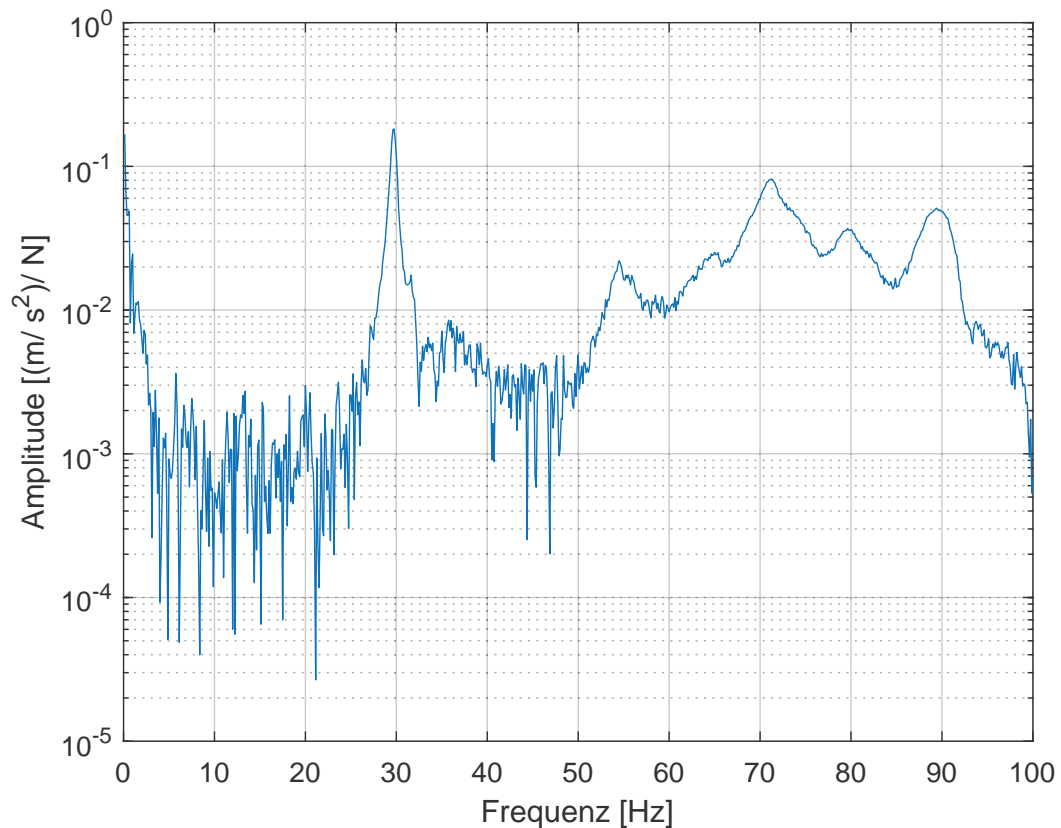


ABBILDUNG 3.10: Gemessene Eigenfrequenzen am Montagerahmen.

Die Abweichung zwischen der Messung und der Berechnung der Eigenfrequenz lässt sich auf mehrere Faktoren zurückführen. Für die Berechnung mit ANSYS wird die Geometrie des Montagerahmens vereinfacht. Die Komponenten sind fest miteinander verbunden und die Anschraubplatten als fixierte Lagerung definiert. Außerdem kann die Masse des Hornets innerhalb der Modalanalyse nicht berücksichtigt werden. Das Berücksichtigen der Steifigkeit des Hornets durch starre Verbindungen entspricht ebenfalls nicht der Realität. Da die Steifigkeit des Hornets nicht bekannt ist, kann diese nicht eindeutig berücksichtigt werden. Die aufgeführten Annahmen und Vereinfachungen führen zu einer höheren Eigenfrequenz bei der Berechnung.

3.6 Traglastanalyse der Decke

Aufgrund des zusätzlichen Lasteintrages durch den Montagerahmen mit signifikantem Gewicht auf die Geschossdecke, ist es sinnvoll eine Abschätzung für die neue Belastung der Decke infolge des Aufbaus des neuen Laborversuches vorzunehmen.

Für die überschlagsmäßige Überprüfung der Traglast ist davon auszugehen, dass es sich bei der 550 mm dicken Geschossdecke um eine Stahlbetondecke mit zusätzlicher Balkenverstärkung von 300 mm im Abstand von 3500 mm handelt. Durch den Aufbau des Montagerahmens werden die an ihm wirkenden Lasten vorrangig an drei Punkten vertikal in die Geschossdecke und an sechs Punkten in die angrenzende Steinwand eingeleitet. Bei der Traglastanalyse ist außerdem der Montagetisch des eCobra 600 und der eCobra 600 als solches zu berücksichtigen, dessen Lasten an vier Punkten vertikal in die Geschossdecke eingeleitet werden.

	Gewicht [kg]
Montagerahmen	677
Hornet 565 4 Axis Standard	55
Montagetisch	200*
eCobra 600 Standard	46,5
	978,5
+12,4% zusätzliches Gewicht für Anbauteile, Personen	121.5
Gesamtgewicht	1100

[*] Schätzwert

TABELLE 3.2: Traglastannahmen

Für das Gesamtgewicht von 1100 kg (vgl. Tabelle 3.2) wird näherungsweise angenommen, dass es sich um einen komplett lotrechten Lasteintrag zur Geschossdecke handelt. Die Verteilung des Gewichtes m auf die vom Montagerahmen aufgespannte Fläche A von $5,1 \text{ m}^2$, ergibt eine Verkehrslast q_K von $2,15 \text{ kN m}^{-2}$, entsprechend Gleichung 3.1.

$$q_K = \frac{m \cdot g}{A} \quad (3.1)$$

Aufgrund der Historie als industrienahes Schulungsgebäude, kann bei dem Gebäude Berliner Tor 21 von einem Gebäude mit industriellem Nutzungszweck ausgegangen werden [21]. Laut DIN EN 1991-1 „Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke- Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau“ ist somit die Nutzungskategorie E2 für industrielle Nutzung weisend [22]. Da für diese Kategorie jedoch keine minimale Nutzlast

angegeben wird, wird die Kategorie E1 für Flächen mit möglicher Stapelung von Gütern einschließlich Zugangsflächen angenommen. Die Kategorie E1 hat eine minimale Nutzlast von $7,5 \text{ kN m}^{-2}$.

Die vorhandene Decke mit zusätzlichem Balkeneintrag ist somit für den in Tabelle 3.2 angenommenen Lasteintrag ausreichend.

4 Robotersystem und Integration

4.1 Greifmechanismen

Die Greifmechanismen stellen die Verbindung zwischen den Greifobjekten und dem jeweiligen Roboter her. Ein sicheres Greifen der Objekte bedingt dabei vorhandenes Wissen über die zu greifenden Objekte, um eine geeignete Greifer- Objekt- Paarung zu bestimmen. Für den Versuchsaufbau stehen die für den Laborraum üblichen Greifobjekte zur Verfügung. Zu diesen Objekten zählen Zylinder, Quader, Muttern und 2x2 Lego® Duplo® Steine. Nähere Informationen über die Objekte sind Tabelle 4.1 zu entnehmen.



Bezeichnung	Mutter	2x2 Lego® Duplo® Stein
Material	Stahl mit Beschichtung	Kunststoff
Abmessungen [mm]	M20	31,8x31,8x19,2 (lxbxh), + Noppenhöhe 4,5; Platz zwischen Noppen Ø13,3
Gewicht [g]	54,5	6,3
Oberfläche	glatt, matt	glatt, glänzend



Bezeichnung	Zylinder	Quader
Material	Aluminium mit Beschichtung	Aluminium mit Beschichtung
Abmessungen [mm]	30x15 (\varnothing xh)	30x30x15 (lxbxh)
Gewicht [g]	30,7	38,2
Oberfläche	glatt, matt	glatt, matt

TABELLE 4.1: Übersicht und Eigenschaften der Greifobjekte

4.1.1 Parallelgreifer am eCobra 600

Der eCobra 600 ist mit dem elektrischen Parallelgreifer MEG 40 EC der Firma Schunk ausgestattet. Da bereits Laborversuche mit dem Parallelgreifer und dem eCobra bestehen und diese auch im neuen Versuchsaufbau durchgeführt werden sollen, bleibt der vorhandene Greifer des eCobra erhalten. Durch beibehalten des ursprünglichen Greifers sind die bestehenden Laborversuche ohne Umbauten am Roboter selbst durchführbar. Da die bestehenden Laborversuche ebenfalls mit den Greifobjekten aus Tabelle 4.1 durchgeführt werden, besteht bereits eine geeignete Greifer- Objekt- Paarung. Der Parallelgreifer MEG 40 EC ist werksseitig für einen bestimmungsgemäßen Betrieb mit dem Controller MEG C 40 ausgelegt und wird dementsprechend im Versuchsaufbau in Kombination mit dem Parallelgreifer verwendet [23]. Die technischen Daten für den Greifer MEG 40 EC und den Controller MEG C 40 sind Tabelle 4.2 und Tabelle 4.3 zu entnehmen.

Über den Controller bestehen drei Einstellmöglichkeiten um den Greifer auf seine Anwendung abzustimmen (vgl. Tabelle 4.3). Die Einstellungen erfolgen über Potentiometer direkt am Controller [23]. Im Sinne einer Taktzeitoptimierung wird eine Vorpositionierung der Greiferbacken über die Hubeinstellung vorgenommen. Die Greiferbackenstellung ist somit im geöffneten Zustand minimal größer als die Abmessungen der Greifobjekte. Im konkreten Anwendungsfall ist eine Spannung von 2,058 V eingestellt, wodurch theoretisch ein Hub von 2,5 mm pro Greifbacke erfolgt. In der Anwendung

Hub pro Finger [mm]	6
Greifkraft [N]	35 - 40
Werkstückgewicht [g]	250
Spannungsversorgung [VDC]	Versorgung durch MEG C 40
Stromaufnahme	Aufnahme durch MEG C 40
Max. Geschwindigkeit (Greifen) [mm/s]	9,5
Eigenmasse [g]	470

TABELLE 4.2: Technische Daten Greifer MEG 40 EC (in Anlehnung an [23])

Spannungsversorgung [VDC]	24
max. Stromaufnahme [A]	1.5
Eigenmasse [g]	300
Einstellmöglichkeiten	- Krafteinstellung - Schließ- und Öffnungszeit (Geschwindigkeit) - Hubeinstellung
Schnittstelle	Digitale/ Analoge I/ O's

TABELLE 4.3: Technische Daten Controller MEG C 40 (in Anlehnung an [23]).

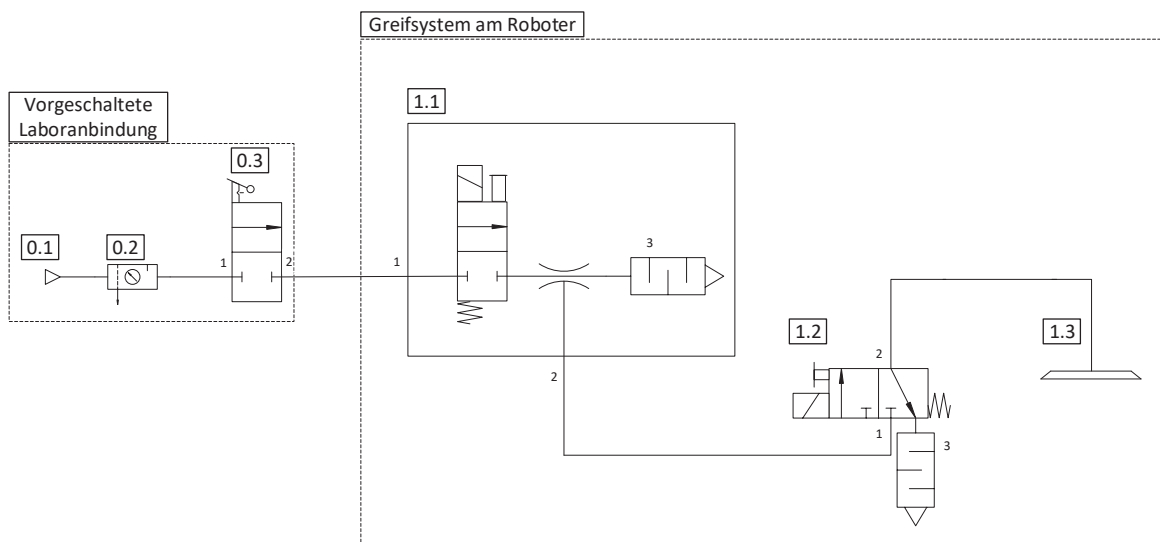
stellt sich jedoch heraus, dass ein Hub von 6 mm pro Greifbacke erfolgt. Im geöffneten Zustand beträgt der Greifbackenabstand 40 mm, im geschlossenen mindestens 28 mm. Es sind somit Greifobjekte mit einer Breite zwischen 28 mm und 40 mm greifbar. Die Greifgeschwindigkeit beträgt $9,7 \text{ mm s}^{-1}$ und hat eine Vorgabespannung von 4,96 V. Die Greifkraft ist mit 4,96 V auf 59,8 N eingestellt (vgl. Abbildung B.1 bis B.3).

Um den Greifer anzusteuern, muss dieser entsprechend der Klemmbelegung am Controller angeschlossen sein (vgl. Tabelle B.1). Die Ansteuerung erfolgt über digitale Ein- sowie Ausgänge. Die Klemmen 13, 20 und 21 für die Funktionen „Greifer steht“ und „Greifer Auf/ Zu“ werden über den Adept IO Blox mit dem eCobra verbunden. Der externe Reset (Klemme 11) wird hingegen über einen separaten, schließenden Drucktaster manuell vom Bediener betätigt. Der Reset führt zu einem Stillstand des Greifers und setzt die Ausgänge am Controller zurück [23].

Der Parallelgreifer ist mit einer zusätzlichen Anschlussplatte am Flansch des Roboters zentriert befestigt. Zusammen mit den Greiffingern hat der Zweifingergreifer eine Gesamtlänge von 140 mm. Durch das Verwenden des Greifers verschiebt sich der mit dem Roboter erreichbare Bereich in $37 \text{ mm} \leq z \leq 247 \text{ mm}$, der Arbeitsbereich aus Sicht des eCobras bleibt jedoch bestehen.

4.1.2 Pneumatisch- elektrisches Sauggreifsystem am Hornet 565

Für die Parallelkinematik wird eine pneumatisch- elektrische Sauggreiferlösung ausgewählt. Das Entwickeln der Greiferlösung für den Hornet 565 auf Basis von Vakuumtechnik ermöglicht eine leichte, schnelle und kompakte Systemlösung [24]. Diese Eigenschaften resultieren aus der geringen Anzahl an beweglichen Teilen. Die hohe Modularität des Vakuumsystems begünstigt ein individuelles, auf die Problemstellung angepasstes Greifsystem. Mit Änderung der Problemstellung ist das System komponentenweise abwandelbar und neu justierbar. Das Greifsystem besteht aus einem Sauger, einem Befestigungselement für den Sauger, einer Vakuumsaugdüse, einem Magnetventil mit Schnellschaltfunktion und entsprechenden Verbindungselementen von Festo. Das zusammengestellte Gesamtsystem zeichnet sich durch eine weitgehende Wartungsfreiheit aus. Das System ist entsprechend der Abbildung 4.1 angeordnet.



Vorgeschaltete Laboranbindung		Greifsystem am Roboter	
0.1	Druckquelle pneumatisch	1.1	Vakuumsaugdüse VN-14-H-T4-PQ3-VQ3-R02-M mit Schalldämpfer
0.2	Wartungseinheit	1.2	Magnetventil mit Schnellschaltfunktion MHE3-MS1H-3/2G-1/8 mit Schalldämpfer
0.3	Absperrventil	1.3	Runder Flachsauger

ABBILDUNG 4.1: Schaltplan des Sauggreifersystems.

Aufgrund der Infrastruktur des Druckluftsystems in der Laborumgebung ist davon auszugehen, dass die Druckluft trocken und gefiltert vorliegt. Außerdem herrschen keine Druckschwankungen im System. Überdrücke werden ebenfalls durch das vorgeschaltete Laborsystem sicherheitstechnisch abgesichert. Das Druckluftsystem im Labor kann einen Betriebsdruck bis 6,5 bar aufbringen, alle verwendeten Bauteile sind für einen Betriebsdruck von mindestens $-0,9$ bar bis 8 bar ausgelegt. An der Wartungseinheit wird der Betriebsdruck für das Greifsystem über eine mechanische Stellmutter am Druckregler manuell durch den Benutzer eingestellt.

Fall 1 Sauggreiferlage horizontal, Bewegungsrichtung vertikal (günstigster Fall)	Fall 2 Sauggreiferlage horizontal, Bewegungsrichtung horizontal	Fall 3 Sauggreiferlage vertikal, Bewegungsrichtung vertikal (ungünstigster Fall)
---	--	---

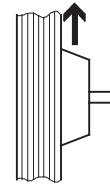
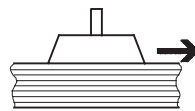
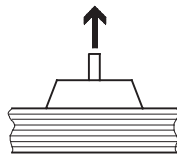


TABELLE 4.4: Fallunterscheidung der Haltekraftauslegung bei Saugern (in Anlehnung an [24]).

Durch die Wahl eines Saugers beschränkt sich der Einsatz der Greifobjekte auf Zylinder, Quader und 2x2 Lego[®] Duplo[®] Steine. Die Greifobjekte des Types Mutter sind theoretisch mit der Seitenfläche greifbar, diese Orientierung ist jedoch nicht mit der Orientierung des elektrischen Parallelgreifers vereinbar. Für das Auslegen des Saugers ist dessen Orientierung und die Art der Bewegung, unter Berücksichtigung der Masse und Beschleunigung des Greifobjektes entscheidend. Für den vorliegenden Anwendungsfall sind Bewegungen nach Fall 1 und Fall 2 möglich (vgl. Tabelle 4.4). Das Berechnen der benötigten Haltekraft des Saugers F_H erfolgt für Fall 1 entsprechend Gleichung 4.1 und für Fall 2 mit Gleichung 4.2 [24].

$$F_H = m \cdot (g + a) \cdot S \quad (4.1)$$

$$F_H = m \cdot \left(g + \frac{a}{\mu}\right) \cdot S \quad (4.2)$$

$$F_A = \frac{F_H}{n} \quad (4.3)$$

Der Sicherheitsbeiwert S ist mit 1,5 anzunehmen, dies entspricht einem unkritischen, homogenen Werkstoff [24]. Für konventionelle Oberflächen, zum Beispiel aus Metall oder Kunststoff, ist ein Reibungskoeffizient μ von 0,5 vorgegeben. Die Masse m ist die maximale bewegte Objektmasse mit 38,2 g (vgl. Tabelle 4.1). Für die Beschleunigung a wird die vom Hersteller empfohlene Beschleunigung für eine Traglast von 0,1 kg am Roboter angenommen. Diese entspricht 54 m s^{-2} [6]. Nach Fall 1 ergibt sich eine erforderliche Haltekraft von 3,66 N (vgl. Abschnitt B.2). Die erforderliche Haltekraft nach Fall 2 entspricht 6,75 N. Das Auslegen des Saugers richtet sich nach dem ungünstigsten auftretenden Fall, welcher für dieses Anwendungssystem Fall 2 ist. Da sich die Anzahl der Sauger n in diesem Greifsystem auf 1 beläuft, entspricht die erforderliche Haltekraft gleich der Abreißkraft F_A nach Gleichung 4.3 [24]. Für das Greifsystem wird ein runder Flachsauger mit einem Durchmesser von 15 mm und einer Abreißkraft von 8,5 N gewählt. Der Sauger besteht aus Nitrilkautschuk und eignet sich für Greifobjekte aus konventionellem, unempfindlichem Material mit einer flachen bis leicht gewölbten Oberfläche [25]. Aufgrund der benötigten Haltekraft und der damit einhergehenden Größe des Saugers, ist dieser Sauger nicht für den Lego[®] Duplo[®] Stein verwendbar durch den zu geringen Noppenabstand (vgl. Tabelle 4.1). Für eine Einzelanwendung der Lego[®] Duplo[®] Steine ist, infolge der geringeren Masse, ein runder Flachsauger mit einem Durchmesser von 10 mm und einer Haltekraft von 3,9 N ausreichend.

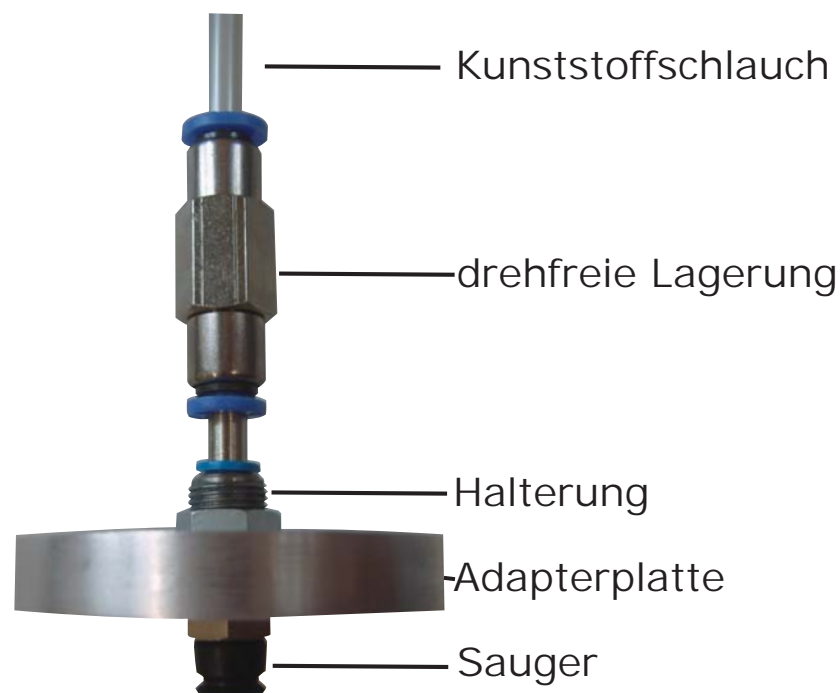


ABBILDUNG 4.2: Aufbau des Greifsystems am TCP des Hornet 565.

Für Sauger mit einem Durchmesser von 10 mm oder 15 mm kann dieselbe Halterung mit der Haltergröße 3 verwendet werden [24]. Der Halter verfügt über ein Außengewinde mit Kontermutter, über welches der Halter mittels einer Adapterplatte an der J4-Plattform des Hornet montiert wird (vgl. Abbildung 4.2, 4.3(a) und B.8)[25]. Um das Gewicht am TCP gering zu halten, ist die Adapterplatte aus Aluminium gefertigt. Der Vakuumanschluss befindet sich oben am Halter und ermöglicht eine geeignete Anbindung durch die J4- Plattform. Weitergehend hat der Halter einen Steckanschluss für weitere Verbindungselemente mit 6 mm Außendurchmesser. Alle Vakuum- und Druckanschlüsse in diesem System sind Steckanschlüsse und passen sich somit an den allgemeinen Laborstandard an. Die Kombination aus Sauger und Adapterplatte ist 28 mm hoch. Der Arbeitsbereich in Z- Richtung des Roboters liegt somit zwischen -775 mm und -1200 mm ausgehend vom Roboterursprung. Bezogen auf das Bodenniveau des Laborraums ergibt sich ein Arbeitsbereich zwischen 904 mm und 1329 mm.



ABBILDUNG 4.3: Installation des Greifmechanismus am TCP des Hornet 565. (a) Ansicht von Unten. (b) Ansicht von Oben.

Das Magnetventil ist mit der Saugerhalterung mit einem 6 mm Kunststoffschlauch aus Polyurethan verbunden. Der Kunststoffschlauch ist mit Kabelbindern an einem Arm des Hornet 565 fixiert (vgl. Abbildung 4.3(b)). Infolge der Armbewegung des Roboters ist keine unzulässige Beanspruchung des 1200 mm langen Kunststoffschlauchs erkennbar. Der Kunststoffschlauch ist ausreichend lang dimensioniert, sodass keine Belastung auf Zug entsteht. Um eine Beanspruchung durch das Verdrehen des TCP am Kunststoffschlauch zu unterbinden, ist der Schlauch am Saugerhalter mittels verschiedener Verbindungselemente drehfrei gelagert (vgl. Abbildung 4.2). Das Magnetventil ist auf dem Montagerahmen befestigt, um die Traglast des Roboters auf ein Minimum

zu begrenzen. Das Magnetventil der Ausführung MHE3-MS1H-3/2G-1/8 mit Schnell-
schaltfunktion ist in Abstimmung auf den Sauger, inklusive Halterung, die Vakuums-
saugdüse und den damit vorgegebenen Anschlüssen gewählt. Das Magnetventil ist ein
3/2- Wegeventil in der Ruhestellung geschlossen, welches im regulären Anwendungsfall
elektrisch ansteuerbar ist. Für die Ansteuerung ist das Magnetventil über den Adept
XIO Termination Block mit dem Hornet verbunden. Neben der elektrischen Ansteue-
rung besteht auch eine manuelle Betätigung des Magnetventils. In Abhängigkeit zur
Vakuumsaugdüse kann im geschlossenen Zustand kein Vakuum am Sauger anliegen,
im offenen Zustand kann ein Vakuum am Sauger anliegen. Die Schnellschaltausführung
des Magnetventils ermöglicht ein Ein- und Ausschalten des offenen Zustandes innerhalb
von 2,3 ms und 2,8 ms [26]. Es unterstützt somit eine optimierte Taktzeit.

Das Magnetventil ist über einen 200 mm langen Kunststoffschlauch mit einem Durch-
messer von 8 mm mit der Vakuumsaugdüse verbunden. Die Vakuumsaugdüse ist eben-
falls auf dem Montagerahmen montiert. Der Einsatz der Vakuumsaugdüse ist tech-
nisch notwendig, da die Laborinfrastruktur nur über eine Druckluftversorgung verfügt.
Das Vakuum wird innerhalb der Vakuumsaugdüse mit dem Venturi- Prinzip erzeugt.
Die Vakuumsaugdüse VN-14-H-T4-PQ3-VQ3-RO2-M hat die Eigenschaft hohes Vaku-
um, wodurch geringe Evakuierungszeiten möglich sind [27]. Die Evakuierungszeit stellt
das Auswahlkriterium für die Vakuumsaugdüse dar [24]. Das Ermitteln der Evaku-
ierungszeit t_E erfolgt mit Hilfe der Evakuierungszeit t_{E1} für 1000 cm^3 bei 6 bar und
des Gesamten zu evakuierenden Volumens V_G . Dieses Volumen beträgt $23,462 \text{ cm}^3$
und berücksichtigt die Volumina der Verbindungselemente, des Magnetventils und der
Saugereinheit (vgl. Tabelle B.2). Die Evakuierungszeit t_{E1} beträgt 1,5 s bei einem Be-
triebsdruck von $-0,7 \text{ bar}$ (vgl. Abschnitt B.2). Entsprechend der Gleichung 4.4 ergibt
sich eine Evakuierungszeit t_E von 0,033 s [24]. In Anlehnung an Gleichung 4.4 berech-
net sich außerdem die Belüftungszeit t_B . Für das System ergibt sich nach Gleichung 4.5
eine Belüftungszeit von 0,011 s bei einer Deevakuierungszeit t_{B1} von 0,5 s für 1000 cm^3
bei 6 bar [24].

$$t_E = V_G \cdot \frac{t_{E1}}{1000 \text{ cm}^3} \quad (4.4)$$

$$t_B = V_G \cdot \frac{t_{B1}}{1000 \text{ cm}^3} \quad (4.5)$$

Die Vakuumsaugdüse ist somit ausreichend groß dimensioniert, sodass die Evakuierungs-
und Belüftungszeiten in einem ausgewogenen Verhältnis zu den Taktzeiten des Hornet

565 stehen. Die Vakuumsaugdüse wird wie das Magnetventil im regulären Anwendungsfall elektrisch angesteuert und ist daher ebenfalls über den Adept XIO Termination Block mit dem Hornet 565 verbunden. Ein Ansteuern über den mechanischen Druckknopf an der Düse ist ebenfalls möglich. Im geöffneten Zustand wird Vakuum erzeugt, im geschlossenen nicht. Um die Geräusentwicklung zu begrenzen ist die Vakuumsaugdüse um einen Schalldämpfer erweitert. Die Vakuumsaugdüse ist mit einem Kunststoffschlauch mit 8 mm Durchmesser mit den vorgeschalteten Laborelementen verbunden.

Um die Druckverluste zwischen dem mechanischen Druckregler bis zur Vakuumsaugdüse infolge von Leitungsverlusten zu kompensieren, ist ein Druck von 4,0 bar am Druckregler einzustellen. An der Vakuumdüse liegt somit ein Betriebsdruck von 3,5 bar an. Der Betriebsdruck ist auf die Vakuumsaugdüse abgestimmt, welche bei 3,5 bar Betriebsdruck ein Vakuum von 92 % erreicht. Die Eigenschaften der Vakuumsaugdüse bleiben in Abhängigkeit zum Betriebsdruck im Bereich von 3,5 bar bis 6 bar nahezu konstant (vgl. Abbildung B.7), sodass keine signifikante Veränderung der Evakuierungszeiten zu erwarten ist.

Komponente	Berechnung der Masse	Masse [g]
Kunststoffschlauch 6 mm	$0,192 \text{ g cm}^{-1} \cdot 120 \text{ cm}$	23,0
Halter Größe 3		20,0
Sauger 15 mm		1,9
Adapterplatte		73,2
Zylinderschraube DIN 912 - M6x12	$4 \cdot 5,1 \text{ g}$	20,4
maximale Objektmasse		38,2
Gesamtmasse m_G		176,7

TABELLE 4.5: Gesamtmasse am TCP des Hornet 565 (in Anlehnung an [25][28]).

Die Nutzlast am TCP unter Berücksichtigung der maximalen Objektmasse beträgt 176,7 g (vgl. Tabelle 4.5). Es sind somit Taktzeiten zwischen 0,35 s und 0,37 s erreichbar (vgl. Tabelle 2.1).

4.2 Übergabestation

Die Übergabestation besteht aus einer kreisförmigen Platte, die sich zwischen den Robotern dreht und von dem Control Motion System angetrieben wird. Da sich die Arbeitsräume der beiden Roboter nicht überschneiden, stellt diese Übergabestation die einzige Möglichkeit dar um Objekte indirekt zu übergeben. Die Aufgabe der Übergabestation besteht dabei im Überführen der Objekte von einem Arbeitsraum in den anderen mit Hilfe einer Drehbewegung.

4.2.1 Drehplatte

Die Platte stellt den zentralen Übergabeort der Objekte dar. Sie fungiert als Schnittstelle zwischen den Objekten, den Greifern und der Übergabestation als solches. Um langfristig eine korrekt definierte Schnittstelle und somit ein sicheres Greifen, insbesondere des Sauggreifers, zu gewährleisten, muss die Platte formstabil sein. Außerdem muss die Platte flexibel und stoßunempfindlich genug sein, sodass potentielle Zusammenstöße zwischen den Robotern und der Platte weder zu einer strukturellen Beschädigung noch zu einem Verlust der Oberfläche führen. Gute Bearbeitungsmöglichkeiten des Materials vereinfachen darüberhinaus die Implementierung in den Versuchsstand.

Neben den mechanischen Eigenschaften des Materials gibt es auch optische Anforderungen an die Platte. Die optischen Anforderungskriterien werden primär tragend, sobald die Roboterzelle um eine visuelle Objekterkennung erweitert wird. In der derzeitigen Konstellation des Versuchsaufbaus unterstützen diese Kriterien das Unterbinden von störenden Reflexionen bei den Lichtschranken. An dieser Stelle sollen die Anforderungskriterien berücksichtigt werden, um eine spätere Implementierung einer Objekterkennung zu vereinfachen. Um störende Einflüsse in der Erkennung zu vermeiden, bedarf es einer matten, monochromen und strukturfreien Oberfläche [29]. Außerdem hat sich in der Anwendung herausgestellt, dass weiße und schwarze Oberflächen Probleme bereiten können. Helle Oberflächen sind im Allgemeinen anzustreben. Um langfristig Farbunterschiede durch Sonneneinstrahlung vorzubeugen, ist auf eine entsprechende Lichtechtheit der Oberfläche zu achten.

Basierend auf den Auswahlkriterien ist eine Platte aus High Pressure Laminate, kurz HPL, sinnvoll. HPL-Platten sind Kunststoffplatten, welche aus einer Mischung aus 30 – 40 % warmhärtendem Harz und 60 – 70 % auf cellulosebasis bestehenden Material bestehen [30]. Aufgrund seiner Zusammensetzung sind HPL-Platten zug- und biegefest, wodurch kein Formverlust durch das Eigengewicht der Platte entsteht. Die

Schlag-, Kratz- und Verschleißbeständigkeit von HPL schützt die Platte vor Schäden durch von außen wirkende Kräfte. Die Oberfläche verfärbt sich durch die UV-Beständigkeit nicht. Außerdem ist HPL pflegeleicht und brandlastarm. Platten aus HPL lassen sich zudem wie Hartholz bearbeiten [31]. Für die Übergabestation wird eine beidseitig beschichtete HPL-Platte mit einer glatten, matten und monochromen Oberfläche verwendet. Die Platte hat eine hellblaue Beschichtung und orientiert sich somit an der Farbgebung des HAW-Logos.

Für einen hohen Überdeckungsgrad zwischen den Robotern und der Platte und somit einer guten Erreichbarkeit der Objekte auf der Übergabestation wird eine HPL-Platte mit einem Durchmesser von 995 mm verwendet. Die Dicke beträgt 10 mm um eine ausreichende Formbeständigkeit zu erreichen. Die Drehplatte hat ein Gewicht von 12,5 kg.

4.2.2 Aufbau der Übergabestation

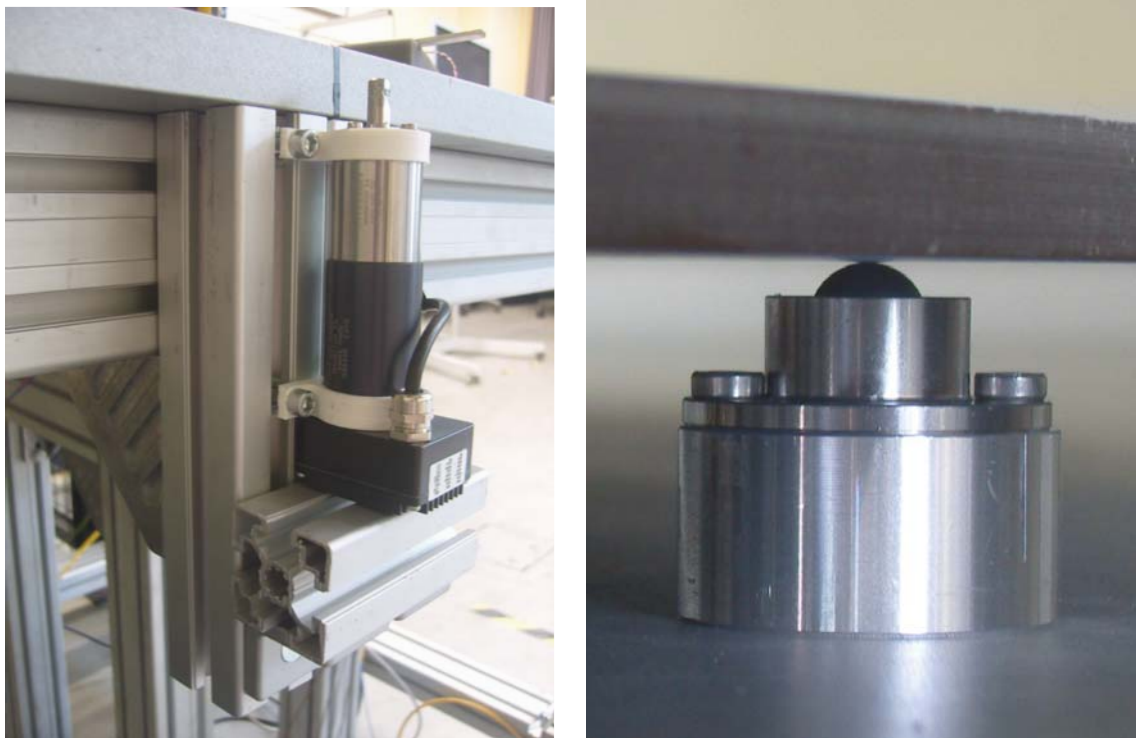
Die Übergabestation ist entsprechend Abbildung 4.4 aufgebaut. Das Motion Control Systems ist orthogonal zur Drehplatte unter dieser angeordnet. Das Drehmoment der Motorwelle wird mittels eines Flansches auf die Drehplatte übertragen. Die Anbindung an die Drehplatte erfolgt über eine Schraubverbindung bestehend aus 3 x M8 Zylinderschrauben. Über eine formschlüssige Verbindung erfolgt die Kraftübertragung vom Motion Control System zum Flansch. Die axiale Sicherung ist aufgrund der Einbauposition des Motion Controllers durch die Gravitationskraft gegeben. Die axiale Belastung des Motion Control Systems durch die Drehplatte liegt im zulässigen Bereich (vgl. Abschnitt 2.4). Die Fertigungszeichnungen für die Drehplatte- Motor- Anbindung sind Abbildung B.10 bis B.14 zu entnehmen.



ABBILDUNG 4.4: Zusammenbau der Übergabestation.

Da die Unterkonstruktion des Montageties des eCobra aus ITEM- Profilen besteht, wird das Motion Control System mit einer ITEM- Profilkonstruktion an diesen montiert. Eine Befestigungslösung aus ITEM- Profilen bietet eine ausreichende Stabilität

um dem Eigengewicht der Drehplatte standzuhalten. Mit einer Konstruktion aus 40er ITEM Profilen wird der Überstand der Tischplatte des Montagetisches überbrückt und ein bündiger Anschluss des Motion Control Systems an die Tischplatte realisiert (vgl. Abbildung 4.5(a)). Das Motion Control System ist mittels 3D- gedruckter Schellen an der Profilkonstruktion fixiert.



(a)

(b)

ABBILDUNG 4.5: Details der Übergabestation. (a) ITEM- Profilkonstruktion zum Befestigen des Motion Control Systems. (b) Abstützrollen.

Das Motion Control System ist zum Ursprung des Hornets und eCobra fluchtend ausgerichtet. Der Abstand zum Ursprung des eCobras beträgt $787,1 \text{ mm}$. Der Überdeckungsgrad zwischen Übergabestation und den Arbeitsbereichen der beiden Roboter ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Aufgrund des Arbeitsbereiches des eCobra kann eine Kollision zwischen dessen Endeffektor und der Übergabestation konstruktiv unterbunden werden. Hierfür wird ein Abstand der Tischplatte zur Oberkante der Drehplatte von 36 mm eingestellt. Der Endeffektor des eCobra kann maximal auf einen Abstand von 37 mm an die Tischplatte verfahren werden. Infolge des Arbeitsbereiches des Hornets ist dies, jedoch nur für den eCobra möglich. Zwei Kugelrollen zwischen der Tischplatte und der Unterseite der Drehplatte geben der Übergabestation zusätzliche Stabilität

und reduzieren die statische Belastung auf die Motorwelle (vgl. Abbildung 4.5(b)). Um den Abstand zur Tischplatte einzuhalten, wird für die Kugelrollen jeweils ein Zylinder als Unterbau gemäß Abbildung B.15 gefertigt. Über die Befestigungsbohrungen an den Kugelrollen sind diese mit dem Zylinder verschraubt. Der Zylinder wiederum ist mit der Tischplatte verschraubt.

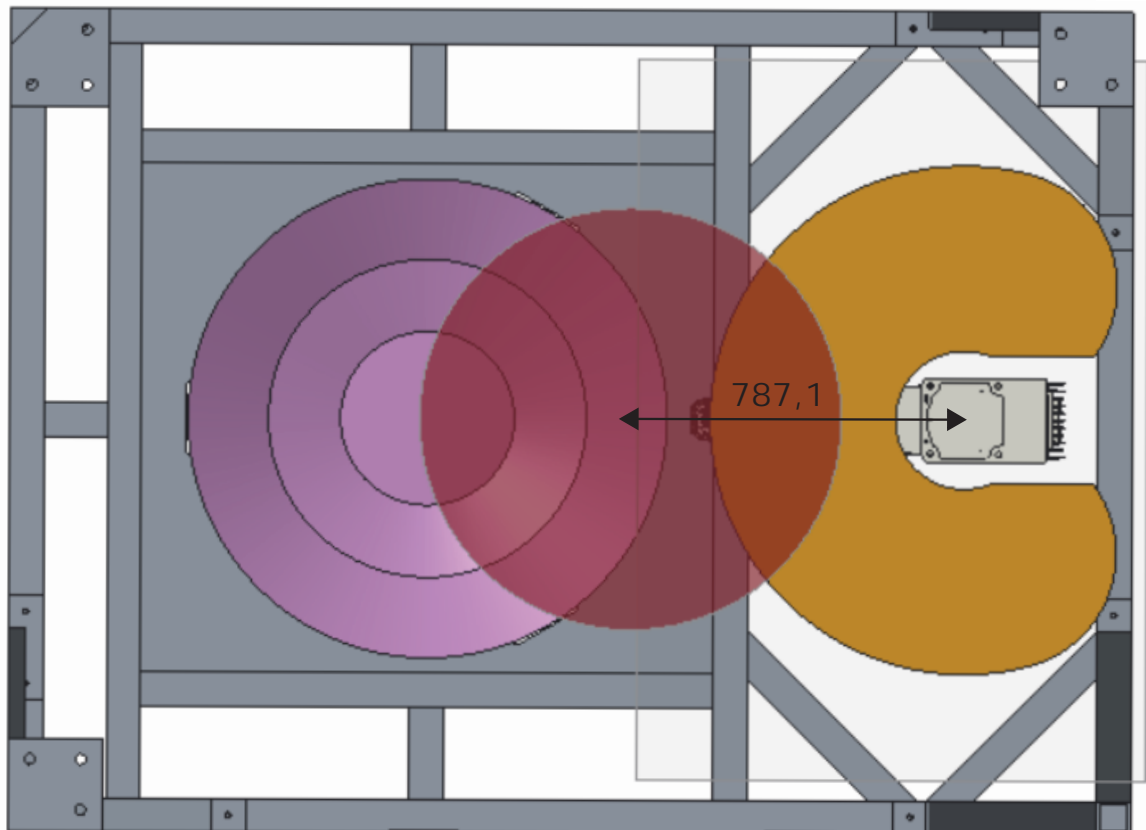


ABBILDUNG 4.6: Montagerahmen mit Hornet 565, eCobra 600 und Drehplatte. Rosa: Arbeitsraum Hornet. Gelb: Arbeitsraum eCobra. Rot: Drehplatte. Transparent: Montagetischplatte.

4.3 Zusammenbau des Robotersystems

Der endgültige Aufbau der Roboterzelle mit allen Integrationen ist in Abbildung 4.7 und 4.8(a) dargestellt. Die Anordnung der einzelnen Komponenten erfolgt entsprechend der vorangegangenen Kapitel. Das Front Panel zum Initiieren von „High Power On“ und einem Not- Aus- Schalter befindet sich an der Seite angrenzend zur KUKA-Schweißroboterzelle. Das Front Panel ist zusammen mit dem Reset für den Parallelgreifer des eCobras in die Blende eingelassen (vgl. Abbildung 4.8(b)). Ein Betätigen der Schalter ist außerhalb der Roboterzelle möglich. Die Blende dient als feststehende

trennende Sicherheitseinrichtung, um ein Durchgreifen durch den vorhandenen Spalt zu verhindern.



ABBILDUNG 4.7: Roboterzelle mit Integrationen.

Die beiden offenen Seiten des Montagerahmens sind mit einer Kombination aus Sicherheitslichtschranke und Umlenkspiegel entsprechend des Sicherheitskonzeptes abgesichert. Der Einbau der Lichtschranken erfolgt unter Berücksichtigung der vorhandenen Lichtschranken an anderen Versuchsaufbauten. Um die Möglichkeit von Interferenzen zu umgehen, wird die Sendeeinheit des Lichtschrankensystems neben die Anschlagtür positioniert [20]. Die Empfängereinheit befindet sich neben dem Front Panel. Für die Winkel zur Montage der Lichtschranken und die offenen Profilen am Montagerahmen sind 3D- gedruckte Abdeckungen vorgesehen (vgl. Abbildung B.16). Ein Drucken der Abdeckungen ist im Rahmen der Thesis nicht möglich.

Der systemtechnische Aufbau der Komponenten untereinander ist schematisch Abbildung 4.9 zu entnehmen. Die Ansteuerung des Robotersystems ist vom Sicherheitskreislauf getrennt aufgebaut. Die Kommunikation mit den Robotern erfolgt via FireWire. Befehle an das Motion Control System werden über die RS-232/ Term Schnittstelle

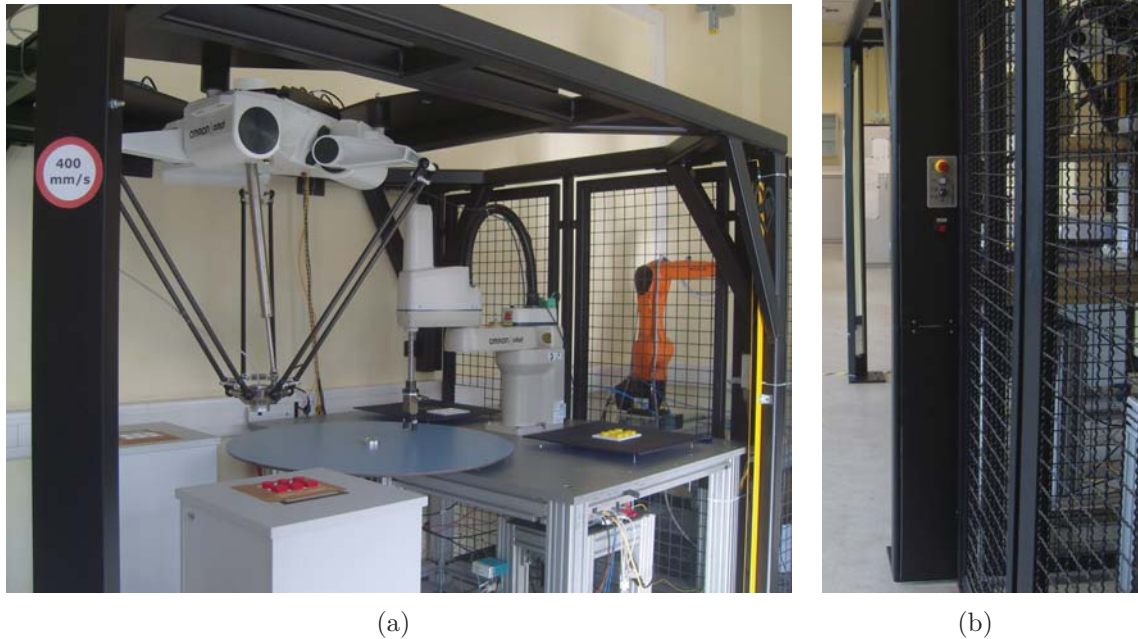


ABBILDUNG 4.8: Details der Übergabestation. (a) Roboterzelle Innenansicht. (b) Blende mit Front Panel und Reset.

übertragen. Die elektrische Verschaltung ist Abbildung B.18 und B.19 zu entnehmen. Zum Ausführen der Roboterbewegungen sind sowohl der Hornet als auch der eCobra an 230 V Netzspannung angeschlossen. Der SmartController EX ist direkt mit der 24 V Spannungsquelle verbunden, und kann über einen internen Kippschalter ein- und ausgeschaltet werden. Die Lichtschrankeneinheit, der Controller des Parallelgreifers sowie der eAIB des Hornets und des eCobras sind über einen Drehschalter mit der 24 V Spannungsquelle verbunden. Der Zustand des Systems wird über den Drehschalter vorgegeben. Das Motion Control System wird über eine separate Spannungsquelle versorgt, da die Stromstärke der anderen Spannungsquelle nicht ausreicht. Über die XUSR- Schnittstelle am SmartController EX kann der Sicherheitskreislauf um Schalteinrichtungen ergänzt und dessen Funktion auf Komponenten übertragen werden [7]. Die Empfangseinheit der Sicherheitslichtschranken ist mittels Halbleiterrelais an den USER E-Stop Channel 1 und 2 geschaltet. Beim Auslösen der Sicherheitslichtschranken oder einem Betätigen des Not- Aus- Schalters wird das Robotersystem in den „High Power Off“- Modus versetzt. Sobald die Lichtschranke nicht mehr blockiert ist oder der Not- Aus- Schalter freigegeben ist, kann ein Initieren des „High Power On“-

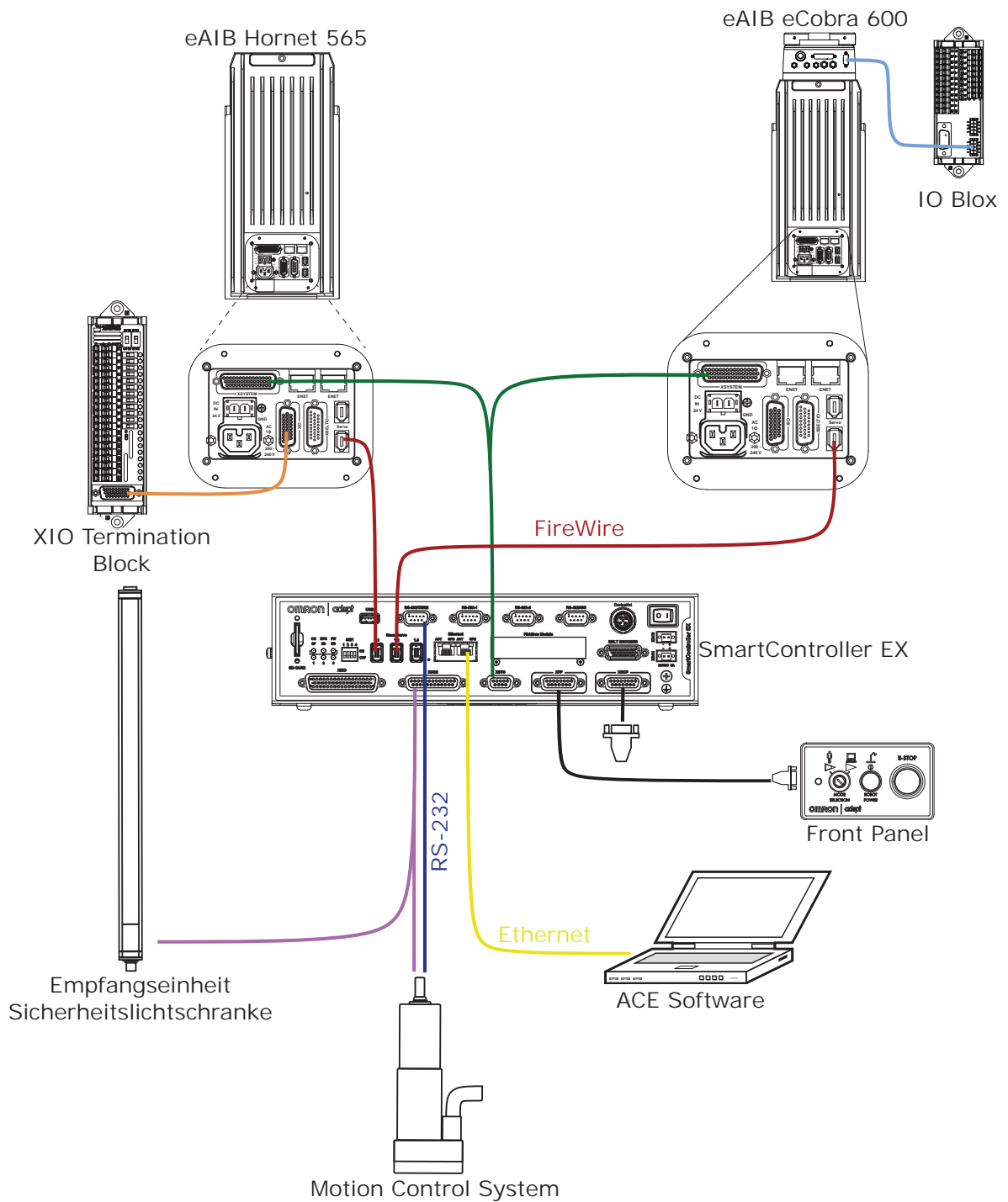


ABBILDUNG 4.9: Schema zum systemtechnischen Aufbau der Roboterzelle.

Modus erfolgen. Die Lichtschranke ist so verschaltet, dass diese automatisch in ihren aktiven Zustand zurückgesetzt wird, sobald die optische Blockade entfernt ist (vgl. Abbildung B.17 und B.19). Die Spannungsversorgung des Motion Control Systems ist mit dem E- Stop Indikations Channel 1 verbunden. Wenn keine Sicherheitseinrichtung

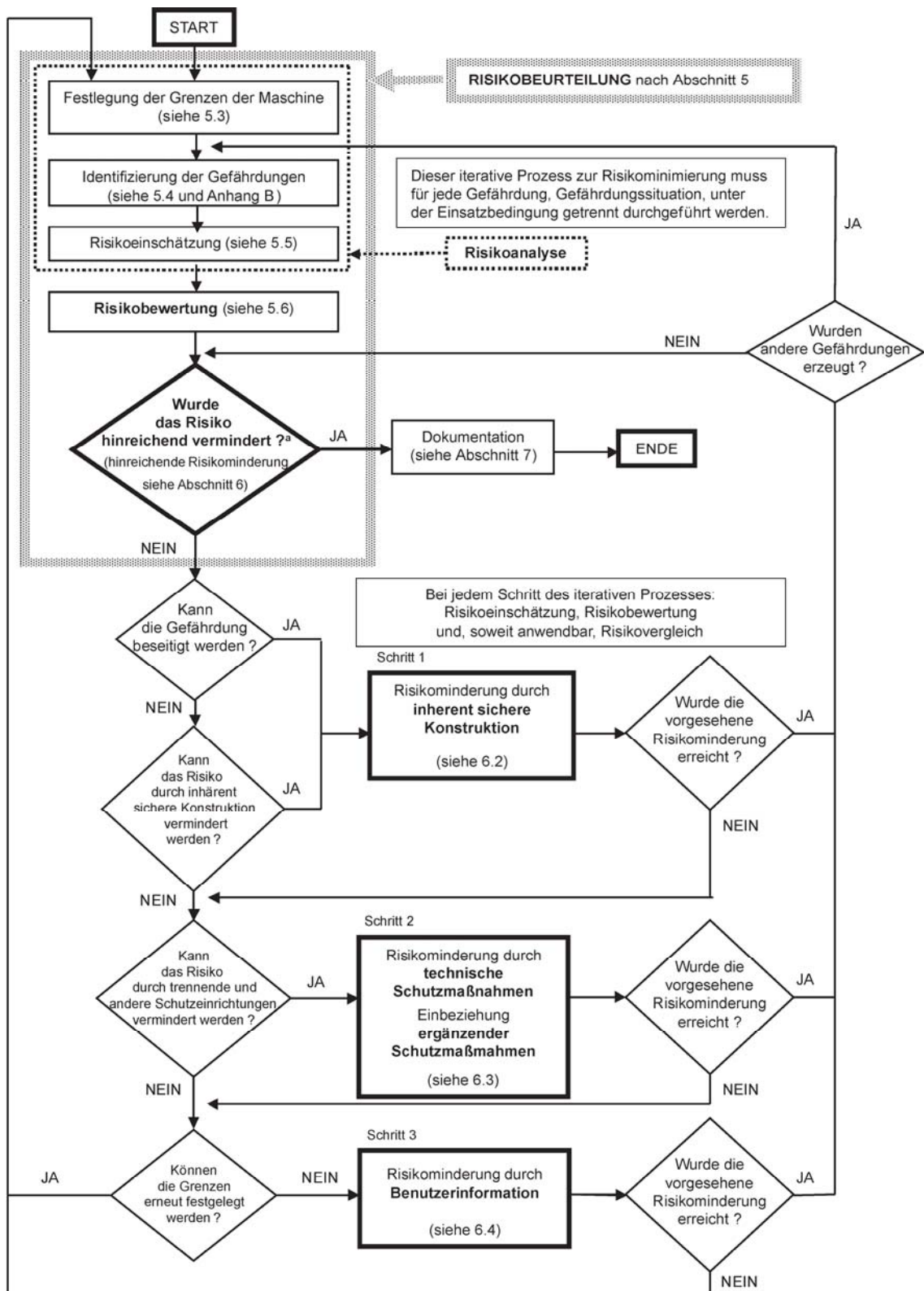
ausgelöst ist, sind die Kontakte geschlossen und eine Spannung liegt am Motion Control System an. Beim Auslösen einer Sicherheitseinrichtung sind die Kontakte geöffnet. Dies ermöglicht ein Abschalten des Motion Control Systems im Notfall zusammen mit den Robotern. Die Belegung der Digital I/O's am XIO Termination Block für die Ansteuerung des Sauggreifsystems ist Tabelle B.3 zu entnehmen. In Tabelle B.4 befindet sich die Belegung der Digital I/O's für das Ansteuern des Parallelgreifers am IO Blox.

5 Sicherheit Robotersystem und Integration

Die Ausarbeitung des Sicherheitskonzeptes erfolgt mit Bezug auf die Typ-A Norm DIN EN ISO 12100 „Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung“. Weitere zu grundlegende Normen für das Sicherheitskonzept sind:

- DIN EN ISO 4414 Fluidtechnik – Allgemeine Regeln und sicherheitstechnische Anforderungen an Pneumatikanlagen und deren Bauteile
- DIN EN ISO 10218 - 2 Industrieroboter -Sicherheitsanforderungen Teil 2 Robotersysteme und Integration
- DIN EN ISO 13855 Sicherheit von Maschinen - Anordnung von Sicherheitseinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen
- DIN EN ISO 14120 Sicherheit von Maschinen - Trennende Schutzeinrichtung - Allgemeine Anforderungen an Gestaltung und Bau von feststehenden und beweglichen trennenden Schutzeinrichtungen
- DIN EN ISO 13850 Sicherheit von Maschinen - Not-Halt-Funktion - Gestaltungsleitsätze

Im Folgenden werden die Risiken für den Laborversuchsaufbau für die kooperative Zusammenarbeit zwischen dem eCobra 600 und dem Hornet 565 mittels einer Übergabestation nach Abschnitt 4.2, betrachtet. Im Mittelpunkt dieses Sicherheitskonzeptes steht die Absicherung des geschaffenen Robotersystems im Betrieb und in der Verwendung. Auf die Risiken resultierend aus Transport, Montage, Installation, Demontage sowie Entsorgung der einzelnen Komponenten wird nachfolgend nicht näher eingegangen. Diese Risiken sind hinreichend in den jeweiligen Bedienungsanleitungen erläutert. Für das Erarbeiten des Sicherheitskonzeptes wird nach Abbildung 5.1 verfahren.



^a Beim erstmaligen Stellen der Frage, wird diese mit dem Ergebnis der Ausgangsrisikobewertung beantwortet.

ABBILDUNG 5.1: Schematische Darstellung des dreistufigen iterativen Prozesses zur Risikominimierung [32].

5.1 Grenzen der Maschine

Das Robotersystem ist für einen bestimmungsgemäßen Betrieb in der Lehre und der Forschung an der HAW Hamburg konzipiert. Zu den Benutzern zählen neben Lehrenden und wissenschaftlichen Mitarbeitern auch Studierende. Für die Studierenden ist ein Arbeiten mit dem Robotersystem innerhalb von Lehrveranstaltungen oder im Selbststudium vorgesehen. Das Arbeiten mit dem Robotersystem erfolgt nur nach Einweisung durch entsprechendes Laborpersonal. In Abhängigkeit der Qualifikationen eines jeden Einzelnen erfolgt das Arbeiten mit den Robotern gegebenenfalls unter Aufsicht. Im Allgemeinen ist der Versuchsstand im 1- Personenbetrieb verwendbar.

Das Robotersystem ist für Pick- und Place- Anwendungen mit den Objekten Zylinder, Quader und 2x2 Lego[®] Duplo[®] Steinen, entsprechend Tabelle 4.1, in kooperativer Zusammenarbeit der beiden Roboter ausgelegt. Das Robotersystem ist ausschließlich im Automatikmodus betreibbar. Der Betrieb des Robotersystems sieht eine Anfangs- und Endposition der Greifobjekte an feststehenden Positionen vor. Da die Arbeitsräume der Roboter sich nicht überschneiden, erfolgt die Übergabe der Objekte indirekt über die Übergabestation. Die Ablage- beziehungsweise Aufnahmepositionen an der Übergabestation bewegen sich rotatorisch relativ zu den Robotern. Der mögliche Bewegungsraum der Roboter befindet sich innerhalb der Roboterzelle, wobei jeweils der maximale Arbeitsraum zur Verfügung steht. Es gibt keinen konkret definierten Bewegungsablauf für die beiden Roboter während der Pick- und Place- Anwendung. Die genauen Bewegungsabläufe der Roboter können somit variieren. Des Weiteren sind die Dauer und die Intensität der konkreten Anwendung nicht uneindeutig determinierbar. Es ist davon auszugehen, dass die Dauer des Roboterbetriebes unterhalb des regulären Produktionsbetriebes liegt, für welchen die Komponenten ausgelegt sind.

Die Arbeiten mit dem Robotersystem unterteilen sich in das Ausführen und das Programmieren der Anwendung. Für das Ausführen eines fertigen Programms, zum Beispiel für Vorführungszwecke, muss das Robotersystem in einem betriebsbereiten Zustand sein. Der betriebsbereite Zustand wird erreicht indem erst der SmartController EX, über den integrierten Kippschalter, und nachfolgend das restliche Robotersystem, über den Drehschalter im Kabelkanal, hochgefahren wird. An dem mit dem Robotersystem verbundenen Rechner über die ACE- Programmierumgebung ist die entsprechende Datei auszuwählen. Um die Roboter in den High Power Zustand zu überführen, muss dieser Zustand an der Software initiiert werden und innerhalb von 10 s am Front Panel über den Druckknopf „High Power On/ Off“ im blinkendem Zustand quittiert sein. Über die Stellmutter am Druckluftregler ist der Betriebsdruck einzustellen. Mit

Auswahl des auszuführenden Tasks über die Software ist der programmierte Inhalt umsetzbar. Zum Abschalten des Systems ist die Energieversorgung des Robotersystems in umgekehrter Reihenfolge zum Einschalten zu trennen. Im Notfall ist das Robotersystem über den Not- Aus- Schalter links neben der Anschlagtür oder den Not- Aus- Schalter am Front Panel, an der Seite zur KUKA- Schweißroboterzelle, abschaltbar. Über den Not- Aus- Schalter neben der Anschlagtür wird der gesamte Laborraum stromlos geschaltet. Mit dem Not- Aus- Schalter am Montagerahmen wird nur der Versuchsstand abgeschaltet. Im Falle dieser Abschaltung bleiben die Digital I/ O's in ihrem gegenwertigen Ansteuerungszustand erhalten. Während des Ausführens der Anwendung hat der Benutzer sich außerhalb der Roboterzelle aufzuhalten. Ein Betreten der Roboterzelle ist nur im „High Power Off“ Zustand für das Positionieren der Greifobjekte zulässig. Für Umbauten am Versuchsstand ist das Robotersystem komplett von der Stromversorgung zu trennen, wobei ausreichend Zeit zwischen dem Trennen der Versorgung und der Roboterbenutzung zum Entladen der Komponenten berücksichtigt werden muss. Entsprechend der Möglichkeiten der ACE- Programmierumgebung ist das Programmieren einerseits über den Emulationsmodus andererseits im Standardmodus mit Anbindung zum Robotersystem durchführbar.

5.2 Identifizierung, Risikoeinschätzung und Risikobewertung der Gefährdungen

Beim Betrieb des Robotersystems sind vernünftigerweise vorhersehbare Fehlanwendungen zu berücksichtigen. Zu diesen Fehlanwendungen zählen:

- Programmierfehler
- Betreten der Roboterzelle bevor „High Power Off“
- Verwenden von anderen Objekten, als in Abschnitt 5.1 angegeben
- Einstellen eines falschen Betriebsdrucks.

Programmierfehler können dazu führen, dass vorgesehene Funktionen nicht ausgeführt werden. Wird das Ausführen eines Programmcodes durch die ACE- Software verweigert, so besteht keine Gefährdung. Die Funktion des Versuchsstandes gilt jedoch als nicht erfüllt. Sollte ein fehlerhafter Programmcode ausgeführt werden, können unerwartete Roboterbewegungen hervorgerufen werden. Dieser Fall kann plötzlich eintreten und zu einem physischen Schaden am Versuchsstand führen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit für Fehler dieser Art ist hoch, insbesondere da die vorgesehenen Benutzer keine

oder nur geringe praktische Erfahrungen in der Programmierung von Industrierobotern mitbringen. Eine Risikominimierung ist daher vorzunehmen.

Ein Betreten der Roboterzelle im „High Power On“- Modus kann zu einem transienten Zusammenstoß oder Quetschungen führen. Die Gefährdung kann plötzlich eintreten und liegt während der gesamten Betriebszeit vor. Der Schaden für die betretende Person ist abhängig von der Roboterkonfiguration, der Nutzlast, der Geschwindigkeit und Orientierung der Gelenke [33]. Im Allgemeinen ist von einem schweren Schadensausmaß auszugehen. Entsprechend des Roboterherstellers ist die Installation einer Schutzeinrichtung vorgeschrieben. Durch den Standort der Roboterzelle in der Laborumgebung ist der Zugang zu dieser rückseitig durch eine Wand versperrt. Die Seite angrenzend zur KUKA- Schweißroboterzelle verhindert ebenfalls das Betreten der Roboterzelle über eine feststehende trennende Schutzeinrichtung in Form eines Gitters (vgl. Abbildung 3.1). Aufgrund der Breite des Montagerahmens ist an dieser Seite ein ungesicherter Spalt. Der Spalt ist breit genug, um einen Arm hindurchzustrecken. Für den Spalt und die verbleibenden zwei Seiten der Roboterzelle sind risikomindernde Schutzmaßnahmen zwingend notwendig.

Das Sauggreifsystem ist für einen Betrieb von **3,5 bar** an der Vakuumsaugdüse ausgelegt. Unachtsamkeit kann zum Einstellen eines falschen Betriebsdrucks führen. Wird versehentlich ein abweichender Druck zwischen **2,8 bar** und **6,0 bar** eingestellt, hat dies keine negativen Auswirkungen auf die Funktionalität des Sauggreifsystems. Abbildung B.7(a) ist zu entnehmen, dass das Druckniveau in diesem Bereich ausreicht um ein Vakuum von **-0,7 bar** aufzubringen. Auf ein Vakuum von mindestens **-0,7 bar** sind die Abreißkräfte der Sauggreifer referenziert (vgl. Abbildung B.4). Ein Druck zwischen **6,0 bar** und **6,5 bar** erfüllt ebenfalls das benötigte Vakuumkriterium. Entsprechend Abbildung B.7(b) kann es jedoch zu geringen Evakuierungszeiten infolge des geringeren Saugvolumenstroms kommen. Ein Betriebsdruck an der Vakuumsaugdüse unter **2,8 bar** erfüllt nicht mehr das Vakuumkriterium. Die Abreißkräfte aus der Auslegung des Vakuumsaugsystems können in diesem Fall nicht mehr garantiert werden. Wenn die Gewichtskraft des Greifobjektes größer ist als die aufgebrachte Haltekraft, kann das Greifobjekt nicht mehr angehoben werden. Die Funktionalität des Greifsystems ist in diesem Fall nicht gegeben. Es liegt jedoch keine Gefährdungssituation vor. Falls jedoch die Haltekraft ausreicht, um das Greifobjekt aufzunehmen, kann es infolge von Beschleunigung zu einem Ablösen des Greifobjektes kommen. Das Herausschleudern des Greifobjektes erfolgt plötzlich und kann zu einem transienten Zusammenstoß mit umstehenden Personen führen. Die Expositionszeit ist jedoch gering.

Ein Umformen der Gleichung 4.2 ermöglicht das Berechnen der kritischen Beschleunigung für die vorgesehenen Greifobjekte in Abhängigkeit zu dem jeweiligen Sauger. Entsprechend Gleichung 5.1 liegt die kritische Beschleunigung a_{krit} für den Quader mit 38,2 g bei $69,3 \text{ m s}^{-2}$ (vgl. Abschnitt B.2). Für den 2x2 Lego[®] Duplo[®] Stein mit 6,3 g liegt die kritische Beschleunigung bei 201 m s^{-2} . Bis zu dieser Beschleunigung reicht die Haltekraft des Saugers aus, sodass sich die Greifobjekte nicht vom Sauger lösen.

$$a_{krit} = \left(\frac{F_H}{m \cdot S} - g \right) \cdot \mu \quad (5.1)$$

Bei Überschreiten der zulässigen Beschleunigung, der aufgebrauchten Abreißkraft oder einer fehlerhaften Ansteuerung bewegt sich das Greifobjekt entsprechend eines waagerechten Wurfes durch den Laborraum. Im schlechtest anzunehmenden Fall bewegt sich das Objekt mit einer Höchstgeschwindigkeit v_{max} von $5,7 \text{ m s}^{-1}$ [5]. Mit der Gleichung 5.2 wird die maximale kinetische Energie ausgehend von dem 38,2 g schweren Quader berechnet.

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{max}^2 \quad (5.2)$$

Die kinetische Energie des Quaders beträgt in diesem Fall 0,62 J. Die Flugbahn des Objekts verhält sich wie ein waagerechter Wurf. Die Ausgangshöhe hängt von der Arbeitshöhe des Hornet 565 ab, welche zwischen 904 mm und 1329 mm liegt. Die Flugbahn der Objekte ist Abbildung 5.2 zu entnehmen.

Eine Kollision mit einer umstehenden ausgewachsenen Person führt zu einem Auftreffen des Objektes in etwa auf Höhe des Oberschenkel- und Bauchbereiches. Die vom Objekt ausgehende kinetische Energie liegt im Falle eines transienten Kontaktes unter der maximal zulässigen Energie von 1,9 J für diese Körperregionen (vgl. Tabelle 5.1). Die maximale zulässige Energie aus Tabelle 5.1 entspricht dem Grenzwert für den Schmerzeintritt [34]. Der Schmerzeintritt definiert das Umschlagen eines spürbaren Druckes zu einem Schmerzempfinden. Da die Gefährdung resultierend aus dem Herausschleudern als gering einzustufen ist, erfolgt keine weitere Risikominimierung.

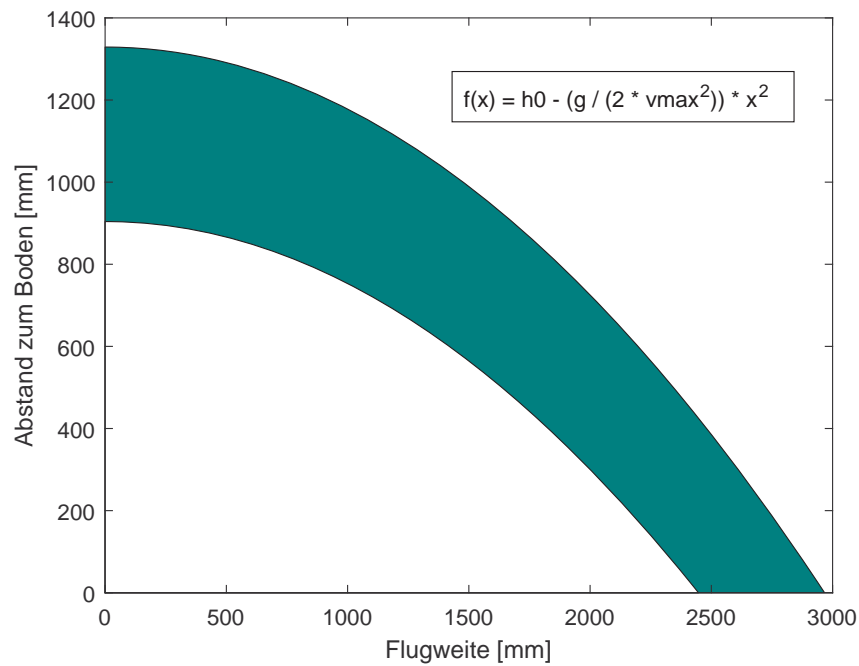


ABBILDUNG 5.2: Diagramm der Flugbahn von herausgeschleuderten Greifobjekten

Körperregion	Maximale übertragene Energie [J]
Schädel und Stirn	0,23
Gesicht	0,11
Hals	0,84
Rücken und Schulter	2,5
Brustkorb	1,6
Bauch	2,4
Becken	2,6
Oberarme und Ellenbogengelenke	1,5
Unterarme und Handwurzelgelenke	1,3
Hände und Finger	0,49
Oberschenkel und Knie	1,9
Unterschenkel	0,52

TABELLE 5.1: Energiegrenzwerte auf der Grundlage des Modells der Körperregionen [34]

Wenn Objekte verwendet werden, die sich in Form, Größe, Material oder Gewicht von

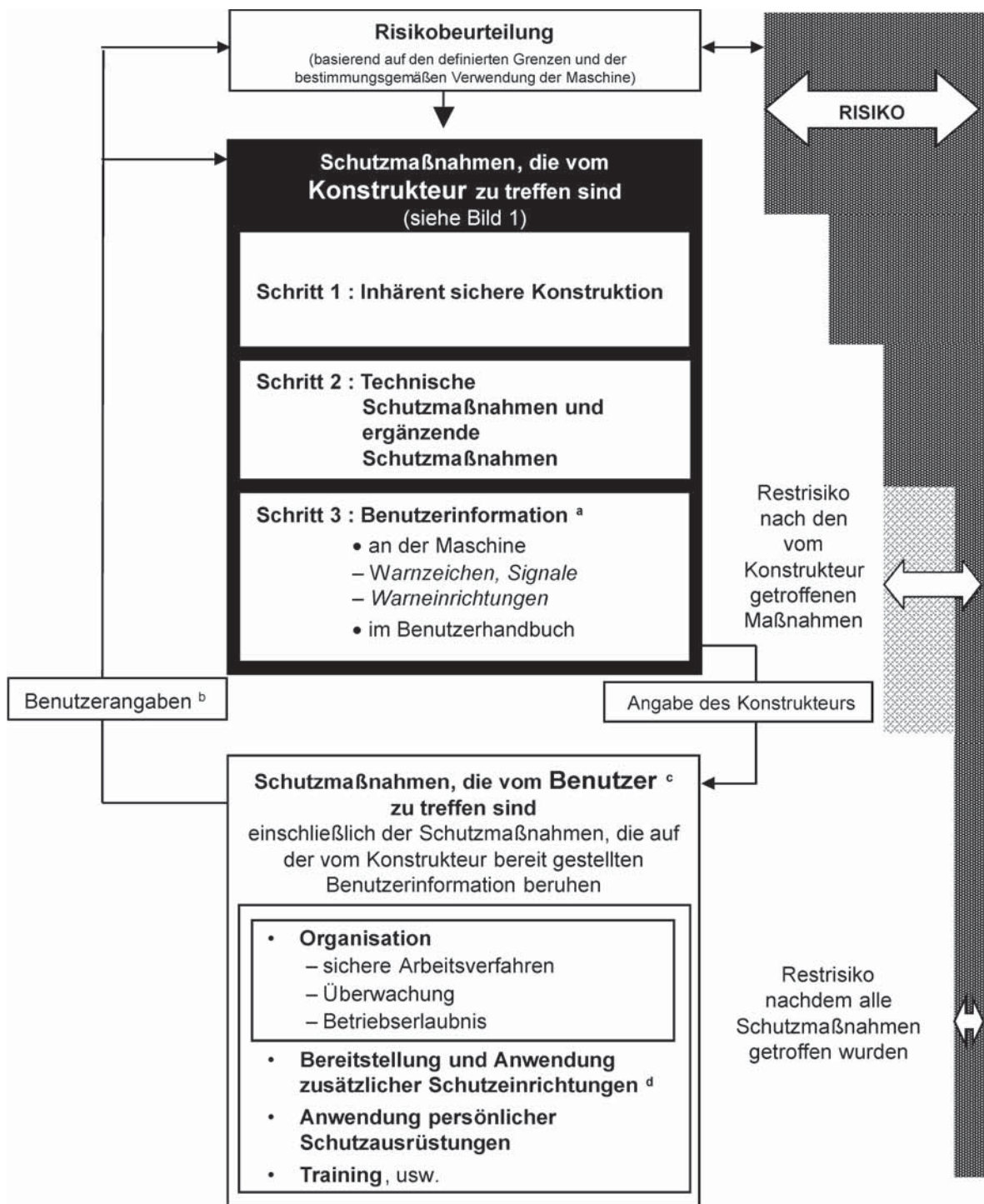
denen aus Abschnitt 5.1 unterscheiden, kann es zu einem Funktionsverlust der Greifsysteme der Roboter kommen. Sind die Greifobjekte durch die beiden Greifsysteme nicht aufnehmbar, kommt es zu einem Funktionalitätsverlust. Sollte sich ein Greifobjekt während des Bewegens lösen, wird es zu einem unkontrollierten Flugobjekt. Es werden dabei die gleichen Szenarien wie beim fehlerhaften Betriebsdruck tragend. Auf risikomindernde Maßnahmen wird daher verzichtet.

5.3 Risikominderung

Das Einleiten von risikomindernden Schutzmaßnahmen erfolgt in Anlehnung an Abbildung 5.3.

Um das Schadensausmaß infolge von unerwarteten Roboterbewegungen zu begrenzen, werden die Roboter innerhalb der Roboterzelle so platziert, dass sich die Arbeitsräume nicht überschneiden. Ein Verhindern von Überschneidungen der Bewegungsräume der Roboter ist inhärent konstruktiv nicht möglich. Der Montagerahmen hat dafür kein ausreichendes Platzangebot durch die grundlegenden Anforderungen an diesen (vgl. Abschnitt 3.1). Dieses Problem kann über die ACE- Programmierumgebung vermieden werden. Hierfür ist das Einstellen eines Hindernisses oder eine entsprechende Programmierung für die Stelle der Überschneidung möglich. Ein Einfahren in diesen Bereich ist dann für einen oder beide Roboter nicht mehr möglich. Ein Zusammenstoßen der Roboter ist somit ausgeschlossen. Für die Roboter besteht weiterhin Kollisionspotential mit der Übergabestation. Für den eCobra wird dies unterbunden, indem die Übergabestation minimal unterhalb des Arbeitsraums des eCobra angeordnet ist (vgl. Unterabschnitt 4.2.2). Für den Hornet besteht keine konstruktive Lösung für diesen Fall.

Um Programmierfehler frühzeitig zu erkennen und zu beheben, empfiehlt sich das Programmieren über die nachfolgende Vorgehensweise. Beim Programmieren sollte immer auf das integrierte Fehlermenü der ACE- Programmierumgebung geachtet werden. Sofern möglich, sollte das Entwickeln eines Programmablaufs zunächst über den Emulationsmodus erfolgen. Hier kann der Bewegungsablauf simuliert werden. Der Anwender sowie der Versuchsstand ist keiner Gefährdung ausgesetzt. Wenn keine Fehler auftreten, kann das Programm mit reduzierter Geschwindigkeit am Versuchstand ausgeführt werden. Interaktiv ist sich an die Endgeschwindigkeit anzunähern. Durch die geringen Anfangsgeschwindigkeiten limitiert sich das Schadensausmaß.



^a Die Bereitstellung einer angemessenen Benutzerinformation ist Teil des Beitrages des Konstrukteurs zur Risikominderung; die betreffenden Schutzmaßnahmen werden jedoch erst mit deren Umsetzung durch den Benutzer wirksam.

^b Benutzerangaben sind Informationen, die dem Konstrukteur entweder von den Benutzern hinsichtlich der bestimmungsgemäßen Verwendung der Maschine im Allgemeinen oder von einem bestimmten Benutzer gegeben werden.

^c Bei den verschiedenen vom Benutzer zu treffenden Schutzmaßnahmen besteht keine bestimmte Hierarchie. Diese Schutzmaßnahmen liegen außerhalb des Anwendungsbereiches dieser Internationalen Norm.

^d Schutzmaßnahmen, die für besondere, im Rahmen der bestimmungsgemäßen Verwendung der Maschine nicht vorgesehene Prozesse oder für besondere, durch den Konstrukteur nicht beeinflussbare Installationsbedingungen erforderlich sind

ABBILDUNG 5.3: Prozess zur Risikominderung aus Sicht des Konstrukteurs [35].

Der Zugang zur Roboterzelle im „High Power On“- Modus kann mit Hilfe von technischen Schutzmaßnahmen verhindert werden. Bei der Auswahl einer geeigneten Schutz- einrichtung darf die bestimmungsgemäße Verwendung des Versuchsstandes nicht beeinträchtigt werden [32]. Eine einfache Anwendung der Sicherheitseinrichtung ist wichtig, damit diese nicht im Normalbetrieb umgangen oder wirkungslos gemacht wird. Im Normalbetrieb ist kein Zugang zur Roboterzelle vorgesehen. Jedoch ist ein Zugang zur Zelle vor und nach dem Ausführen des Programmablaufs notwendig, um die Greifobjekte positionieren zu können. Ein Zugang zur Roboterzelle wird daher oft benötigt. Außerdem sollte die freie Sicht auf die Roboter nicht durch die Schutz- einrichtung eingeschränkt werden. Die Schutz- einrichtung muss den Schutz von allen umstehenden Personen sicherstellen können. Basierend auf diesen Kriterien wird der Spalt mit einer trennenden feststehenden Schutz- einrichtung in Form einer Blende abgesichert (vgl. 4.8(b)). Für die beiden zugänglichen Seiten wird eine nichttrennende Schutz- einrichtung in Form einer AOPD (aktive optoelektrische Schutz- einrichtung) verwendet. Als sicherheitsbezogenes Teil einer Steuerung muss die AOPD mindestens ein Sicherheitsniveau von Performance Level $PL = d$ oder Kategorie 3 erfüllen [36]. Die AOPD hat somit 2 Sicherheitsschaltkreise, die mit dem SmartController EX über die XUSR- Schnittstelle verbunden werden.

Für die AOPD wird das Infrarot- Lichtschrankensystem PSEN op4H-s-30-180/1, bestehend aus Sender- und Empfängereinheit, von Pilz verwendet [20]. Der Basis Licht- vorhang Typ 4 ist für Anwendungen bis PL e und SIL CL 3 einsetzbar. Der Einsatz des Umlenkspiegels PSEN op Mirror- 190/1 ermöglicht ein Umlenken der Lichtstrahlgeometrie und gewährleistet somit den Schutz der beiden Seitenflächen. Die Sicherheitslicht- schranke hat eine Auflösung d von 30 mm, wodurch ein Handschutz gewährleistet ist. Die Ansprechzeit t_1 beläuft sich auf 28 ms. Um ein Umgehen der Schutz- einrichtung durch Hinüberreichen oder drunter durchgehen zu vermeiden, hat die Licht- schranke eine Schutzfeldhöhe von 1800 mm. Für das Verwenden von berührungslos wirkenden Schutz- einrichtungen in Form von AOPD's ist ein Mindestsicherheitsabstand S_{min} zum Gefahrenpotential zu berücksichtigen [37]. Für das Berechnen des Mindestsicherheits- abstandes wird die Nachlaufzeit T_N des Gesamtsystems nach Gleichung 5.3 benötigt [37]. Diese setzt sich aus der Ansprechzeit der Licht- schranke t_1 und der Anhaltezeit für die Maschine t_2 zusammen. Für den eCobra mit einer Anhaltezeit von 0,28 s ergibt sich eine Nachlaufzeit von 0,308 s (vgl. Anhang C). Der Hornet hat eine Nachlaufzeit von 0,118 s unter Berücksichtigung seiner Anhaltezeit von 0,09 s.

$$T_N = t_1 + t_2 \quad (5.3)$$

$$S_{min} = (K \cdot T_N) + 8 \cdot (d - 14\text{mm}) \quad (5.4)$$

Der Mindestsicherheitsabstand berechnet sich entsprechend Gleichung 5.4 über die Annäherungsgeschwindigkeit von Körperteilen K , die Nachlaufzeit und die Auflösung d der verwendeten Sicherheitslichtschranke [37]. Entgegen der DIN EN ISO 13855 wird für die Annäherungsgeschwindigkeit ein reduzierter Wert von 400 mm s^{-1} angenommen. Für den Hornet ergibt sich daraus ein Mindestsicherheitsabstand zur Lichtschranke von $175,2 \text{ mm}$, für den eCobra $251,2 \text{ mm}$ (vgl. Anhang C).

Um den Anwender und umstehende Personen auf die reduzierte Annäherungsgeschwindigkeit aufmerksam zu machen, ist dieser Punkt in der Laboreinweisung zu thematisieren. Zusätzlich ist ein Warnschild gut sichtbar anzubringen, welches über die reduzierte Geschwindigkeit innerhalb des Labors von 400 mm s^{-1} informiert.

5.4 Bewertung des Sicherheitskonzeptes

Über die konstruktiven Maßnahmen zur Anordnung der Roboter und der Übergabestation kann das Risikopotenzial für Kollisionen drastisch reduziert werden. Mit der empfohlenen Vorgehensweise zum Programmieren des Versuchsstandes wird das Risiko weiter verringert. Ein Restrisiko bleibt trotz der vorgenommenen Schutzmaßnahmen weiterhin bestehen. Die Integration der Sicherheitslichtschranken führt dazu, dass ein Betreten des Versuchsstandes im „High Power On“-Modus nicht mehr möglich ist. Ein Durchqueren der Lichtschranken führt dazu, dass das Robotersystem in den E-Stop-Modus umschaltet. Das Einbauen der Lichtschranken stellt somit einen zusätzlichen E-Stop dar. Die Funktionalität der E-Stop-Funktion ist auf das Abschalten des Versuchsstandes begrenzt. Durch eine entsprechende Beschilderung und eine Einweisung sind die Anwender ausreichend über die reduzierte Geschwindigkeit im Laborraum aufgeklärt. Mit einem Herausschleudern von Greifobjekten ist nach wie vor zu rechnen. Diese können nicht durch das Lichtschrankensystem aufgehalten werden. Die Risikoanalyse hat jedoch aufgezeigt, dass herausgeschleuderte Greifobjekte keinen Schaden bei Kollisionen mit umstehenden Personen hervorrufen. Mit Hilfe der eingeleiteten Schutzmaßnahmen zur Risikominderung werden alle aufgezeigten Gefährdungen hinreichend eliminiert.

6 Entwicklung demonstrativer Anwendungen

Für den Versuchsaufbau sind zwei verschiedene demonstrative Pick- und Place- Anwendungen geplant. Die erste Anwendung „Hornet vs. eCobra“ stellt die Roboter in einen direkten Vergleich. In dieser Anwendung wird die Schnelligkeit der beiden Roboter demonstriert. In der zweiten Anwendung sollen die Roboter mit Hilfe einer Übergabestation kooperativ zusammenarbeiten.

Innerhalb der ACE- Programmierumgebung wird der Versuchsstand virtuell nachgebaut, sodass die im 3D- Visualisierer dargestellte Ansicht mit der Realität übereinstimmt. Dies erleichtert das Programmieren, insbesondere im Emulationsmodus. Entsprechend des Sicherheitskonzeptes muss über die Programmierung abgesichert sein, dass die Roboter nicht miteinander kollidieren können. Auch wenn die Roboter über den SmartController EX miteinander verbunden sind, besteht kein Wissen über die Position des jeweils anderen Roboters. Der Anwender muss dies explizit vorgeben. In den beiden Anwendungsfällen ist für den Hornet ein Hindernis an die Position der Bewegungsraumüberschneidung gesetzt. Ein Einfahren in den Bereich ist für den Hornet nicht mehr möglich. Für den eCobra wird keine Einschränkung getroffen. Diese Variante ist möglich, da der Hornet nicht in dem Bereich der Überschneidung arbeiten muss. Außerdem wird eine maximale Überschneidung zwischen dem eCobra und der Übergabestation beibehalten. Die Überschneidung zwischen dem Hornet und der Übergabestation wird nicht signifikant eingeschränkt. Zusätzlich ist für den Hornet ein Hindernis an der Stelle der Übergabestation definiert. Für beide Anwendungen stehen jeweils 13 eingeteachte Punkte je Roboter zu Verfügung. Die Punkte unterteilen sich in 12 Aufnahme- und Ablagepunkte für die Greifobjekte und einen Punkt für die Ausgangsstellung des Roboters. Über den 3D- Visualisierer können diese angezeigt werden. Die Punkte sind schematisch entsprechend Abbildung 6.1 zu den Robotern angeordnet. Für den eCobra sind die Koordinaten der Punkte Abbildung D.1 und für den Hornet Abbildung D.2 zu entnehmen.

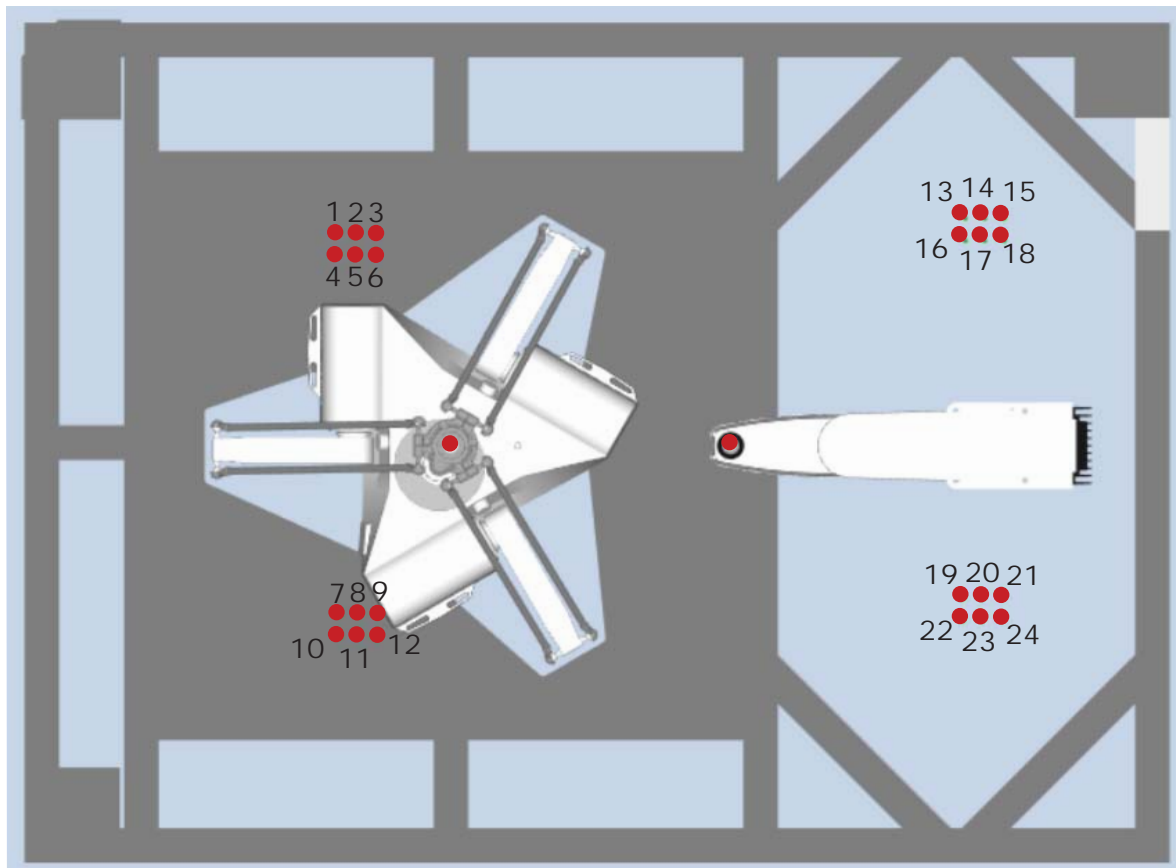


ABBILDUNG 6.1: Schematische Darstellung der eingeteachten Punkte.

Beim Verwenden von mehreren Robotern ist jeder Programmcode der eine Roboterbewegung enthält dem jeweiligen Roboter zuzuweisen. Die Zuweisung erfolgt über den Befehl *SELECT* mit der entsprechenden Roboternummer. Außerdem muss der Befehl *ATTACH* ausgeführt werden, damit der Roboter angesteuert werden kann.

6.1 Hornet vs. eCobra

Im Anwendungsfall „Hornet vs. eCobra“ haben beide Roboter den selben Programmablauf. Jeweils sechs Greifobjekte müssen von ihrer Ausgangsposition in eine Zwischenablage und wieder zurück transportiert werden. In dieser Anwendung arbeiten die Roboter gegeneinander. Innerhalb des Programms *ecobravvs()* wird der Programmierablauf für den eCobra dargestellt (vgl. Abbildung D.6). Über die Subroutine *gripperprecond()* wird sichergestellt, dass der Parallelgreifer zu Beginn der Anwendung geöffnet ist (vgl. Abbildung D.5). Das Öffnen und Schließen des Greifsystems wird über die Subroutinen *gripperopen()* und *gripperclose()* realisiert (vgl. Abbildung D.3 und D.4). Der eCobra 600 benötigt 31,5050 s für das Ausführen des Programmcodes.

Der Programmablauf für den Hornet 565 ist in dem Programmcode *hornetvs()* abgebildet (vgl. Abbildung D.7). Der Programmcode ist entsprechend dem des eCobra aufgebaut. Er unterscheidet sich jedoch im Ansteuern des Greifers und in den angefahrenen Punkten. Für den Einsatz des Greifsystems am Hornet 565 wird lediglich der jeweilige Digital I/ O aktiviert. In der Anwendung hat sich gezeigt, dass das Vakuum im Verbindungsschlauch zwischen dem Sauger und dem Magnetventil beim Ablegen der Greifobjekte, diese springen lässt. Es ist daher ein *DELAY* programmiert, sodass sich das Vakuum vollständig abbauen kann bevor sich der Hornet vom Greifobjekt entfernt. Der Hornet 565 benötigt 21,1530 s zum Beenden der Routine. Der Hornet 565 ist somit schneller als der eCobra.

6.2 Kooperative Zusammenarbeit

Für das Ausführen einer kooperativen Zusammenarbeit zwischen dem eCobra 600 und dem Hornet 565 ist das Motion Control System in die ACE- Programmierumgebung einzubinden. Innerhalb des Programmcodes *serialmotor()* wird der Motion Controller mit *ATTACH* der seriellen Schnittstelle „0“ zugewiesen (vgl. Abbildung D.9). Mit dem Befehl *FSET* werden die Eigenschaften der RS-232 Schnittstelle entsprechend Abschnitt 2.4 definiert. Über den *WRITE*- Befehl können Funktionen des Cotrollers angesteuert werden. Innerhalb des Befehls *WRITE* ist der ASCII- Befehlssatz des Motion Control Systems zu verwenden. Für den Motion Controller ist eine Einstellung der Regelparameter über den Motion Manager 6 erfolgt. Die Einstellungen sind der Parameterdatei zu entnehmen (vgl. Abbildung D.8). Bei einer Regelung auf eine Soll-drehzahl von 300 min^{-1} osziliert der Istwert um den Sollwert mit einer Amplitude von 20 min^{-1} . Ein genaue Defintion des Aufnahmepunktes ist somit iterativ zu bestimmen. Bei einer Drehzahl von 300 min^{-1} an der Welle des Motion Controllers behalten die Greifobjekte ihre Position auf der Drehplatte bei.

Da das Greifsystems des eCobras nicht zuverlässig ist und beim Ausführen vom Programmcode blockiert, ist für die kooperative Zusammenarbeit nur ein theoretisches Konzept möglich. Zwischen dem Ablegen und Aufnehmen beschreiben die Greifobjekte auf der Drehplatte eine kreisförmige Bahnkurve. Am einfachsten lässt sich das Greifen und Ablegen der Objekte entlang der X- Richtung der Roboter realisieren. Die Zeit, welche die Greifobjekte benötigen um eine 180° Drehung auf der Übergabestation zu vollenden, lässt sich über die Winkelgeschwindigkeit berechnen. Die Zeit kann mit einem *DELAY* berücksichtigt werden. Als Ausgangspunkt des *DELAY*- Befehls kann ein Wechsel beim Ansteuern des Greifsystems des ablegenden Roboters verwendet werden.

7 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit konnte eine Roboterzelle für die kooperative Zusammenarbeit zwischen dem Hornet 565 und dem eCobra 600 realisiert werden. Der Montagerahmen, welcher zugleich die Roboterzelle darstellt, wurde entsprechend der räumlichen Begebenheiten und der Herstelleranforderungen für den Hornet 565 entwickelt. Die in der Entwicklung angestrebte Eigenfrequenz des Montagerahmens von > 40 Hz für hochdynamische Anwendungen, ließ sich in einer anschließenden Frequenzmessung nicht bestätigen. Die Messung am realen Montagerahmen ergab eine erste Eigenfrequenz von $29,5$ Hz. Der Montagerahmen erfüllt somit das Anforderungskriterium für reguläre Anwendungen mit dem Hornet 565. Für den Hornet 565 wurde weiterhin ein Greifsystem ausgewählt und ausgelegt. Das elektrisch- pneumatische Sauggreifsystem ist auf die vorgesehenen Greifobjekte abgestimmt. In der Anwendung hat sich gezeigt, dass das System zuverlässig, schnell und robust ist. Das Sauggreifsystem stellt ein geeignetes Greifsystem für den Hornet 565 dar. Über die elektrische Ansteuerung konnte das Sauggreifsystem mittels des XIO Termination Blocks über die ACE- Programmierumgebung angesteuert werden.

Die Übergabestation wurde mit Hilfe einer runden Drehplatte aus HPL realisiert. Um eine Anbindung zum Motion Control System zu ermöglichen, wurden Befestigungselemente gefertigt. Über die RS-232 Schnittstelle am Motion Controller wurde die Übergabestation an den SmartController EX angeschlossen. Für die Ansteuerung über die ACE- Programmierumgebung wurde ein entsprechender Programmcode entwickelt. Über den Motion Manager 6 ist eine Einstellung des Motion Control Systems erfolgt. Die Regelung des Motion Control Systems zeigt eine vergleichsweise hohe Abweichung zwischen Ist- und Sollwert auf. Das genaue Aufnehmen von der Übergabestation ist somit erschwert. Über die XUSR- Schnittstelle am SmartController EX ist die Übergabestation mit dem Sicherheitskreislauf des Robotersystems verbunden. Die Drehplatte wird mit Auslösen einer Sicherheitseinrichtung ausgeschaltet. Die Empfängereinheit der Sicherheitslichtschranken ist ebenfalls mit dem Sicherheitskreislauf der Steuerung über die XUSR- Schnittstelle verbunden. Beim Blockieren der Sicherheitslichtschranke wird das Robotersystem abgeschaltet. Durch die Verwendung eines Umlenkspiegels

kann ein Lichtschrankensystem für die Absicherung des Montagerahmens über zwei Seitenflächen verwendet werden. Im Sinne des entwickelten Sicherheitskonzeptes stellen Sicherheitslichtschranken eine geeignete Schutzeinrichtung dar, um Benutzer vor dem Betreten der Roboterzelle im „High Power On“- Modus zu schützen. Innerhalb des Sicherheitskonzeptes wurde ermittelt, dass mit dem Herausschleudern von Greifobjekten zu rechnen ist. Diese stellen jedoch keine Gefährdung für den Benutzer dar. Außerdem wurden Verfahrensanweisungen ausgearbeitet, welche das Risiko für Programmierfehler reduzieren.

Eine Inbetriebnahme des Robotersystems ist erfolgt. Eine Ansteuerung der Roboter sowie der Übergabestation über die ACE- Programmierumgebung ist möglich. Die Sicherheitseinrichtungen wurden ausgetestet und erfüllen ihren Zweck. Für die demonstrativen Anwendungen wurde eine Grunddatei erstellt, welche den physischen Systemaufbau der Roboterzelle und die Anbindung des Motion Control Systems enthält. Diese kann für zukünftige Programmierarbeiten verwendet werden. Die Anwendung „Hornet vs. eCobra“ zeigt die Roboter im direkten Vergleich zueinander. Beide fahren den gleichen Parkour, wobei der Hornet diesen schneller absolviert, sowohl in der Simulation als auch in der Realität. Im Gegensatz zur Simulation bestehen Probleme beim Umsetzen des Programmablaufes in der Realität. Das Greifsystem des eCobras blockiert häufig beim Ausführen des Programms. Ein Ausführen der vorgesehenen Funktionen des eCobras waren nur bedingt möglich. Für die kooperative Zusammenarbeit der beiden Roboter mit der Übergabestation besteht daher nur ein theoretisches Konzept, dessen Umsetzung aussteht. Eine Taktzeitoptimierung war im Rahmen der Arbeit nicht möglich.

Die entwickelte Roboterzelle bildet die Grundlage für eine kooperative Zusammenarbeit zwischen dem Hornet 565 und dem eCobra 600. Die Arbeit soll als Grundlage für künftige Projekte mit dem Versuchsstand dienen. Mit dieser Arbeit wurden die grundlegenden notwendigen Funktionen für eine Zusammenarbeit realisiert. Über das Erweiterungs- sowie Verbesserungspotential gibt Kapitel 8 Aufschluss.

8 Ausblick

Im Nachfolgenden soll näher auf die Erweiterungs- und Verbesserungspotentiale der geschaffenen Roboterzelle eingegangen werden.

Um den Übergang von der virtuellen Darstellung des Ablaufprogramms in die Realität zu vereinfachen, ist ein zuverlässiges Greifsystem am eCobra 600 notwendig. Das derzeitige Greifsystem führt die Befehle nur unzureichend aus. Es ist daher eine Fehleranalyse des bestehenden Greifsystems oder eine Neubeschaffung anzustreben.

Die Übergabestation zeigt im laufenden Betrieb eine hohe Geräusentwicklung auf. Diese lässt sich auf die Abstützrollen an der Drehplatte zurückführen. Die Kombination aus der Beschichtung der HPL- Platte und den Edelstahlrollen scheint keine optimale Paarung zu sein. Mit dem Einsatz von Kunststoffrollen könnte die Geräusentwicklung verringert werden.

Im Sinne der Forschung und Lehre besteht die Möglichkeit die Leistungsgrenzen der Roboter auszutesten. Dies kann einerseits durch ein Erhöhen der Nutzlast am TCP erfolgen. Andererseits kann innerhalb der ACE- Programmierumgebung die Beschleunigungsrate der Roboter angepasst werden. Eine erhöhte Beschleunigung kann einen positiven Effekt auf die Taktzeit haben. Bei hochdynamischen Anwendungen mit dem Hornet 565 ist der Einfluss des Montagerahmens zu berücksichtigen. Da der gewerartige Montagerahmen nicht das Frequenzkriterium nach > 40 Hz erfüllt, ist mit einer längeren Taktzeit oder einer geringeren Präzision zu rechnen. Ist dies unzulässig, muss der Montagerahmen zusätzlich versteift werden. In Anlehnung an die Berechnung des Montagerahmens ist eine Versteifung am UPE- Profil oder um den Montagepunkt des Hornets zum Laborraum hin am erfolgsversprechensten. Außerdem ist für dieses Experiment das Verwenden der Lego[®] Duplo[®] Steine ratsam, da diese eine höhere kritische Beschleunigung aufweisen.

Im Allgemeinen sind die Möglichkeiten und die Heransgehensweisen beim Programmieren der Roboter mit dem derzeitigen Versuchsaufbau sehr statisch. Die Annäherung an die Schnittstellen ist aufwendig, fehleranfällig und zeitintensiv. Eine Verbesserung der Regelparameter am Motion Control System unterstützt die gezielte Aufnahme der

Greifobjekte von der Drehplatte. Außerdem könnten Endcoder oder fest definierte Aufnahmen auf der Drehplatte beim Erkennen der Position der Greifobjekte unterstützen. Mit dem Verwenden von ACE- Sight oder anderen Objekterkennungen besteht die Möglichkeit willkürlich angeordnete Objekte zu erkennen. Der Einsatz einer Objekterkennung verleiht dem Versuchsstand eine höhere Eigendynamik.

Literatur

- [1] Steven Wyatt, Hrsg. *IFR Press Conference*. International Federation of Robotics (IFR). Shanghai, VOLKSREPUBLIK CHINA, Sep. 2019.
- [2] Mathias Brandt. *So viele Roboter kommen auf 10.000 Beschäftigte*. <https://de.statista.com/infografik/13676/roboterdichte-in-der-fertigungsindustrie/>. Zugriff: 16.05.2020. Sep. 2019.
- [3] Büsra Türk; Anisha Zaidi; Dr. Thomas Wolf. *Roboter im deutschen Maschinenbau*. PricewaterhouseCoopers AG Wirtschaftsprüfungsgesellschaft, Nov. 2016.
- [4] *eCobra 600, 800 and 800 Inverted Robots User's Guide*. I593-E-05, 14402-000 Rev. F. OMRON Corporation Industrial Automation Company. Kyoto, JAPAN, 2019.
- [5] *Robotic Automation Industrial Robots Datasheets*. I822-E1-08. OMRON Corporation Industrial Automation Company. Kyoto, JAPAN, 2019.
- [6] *Hornet 565 Robot User's Guide*. I596-E-08, 14608-000 Rev. L. OMRON Corporation Industrial Automation Company. Kyoto, JAPAN, 2019.
- [7] *SmartController EX User's Guide*. I602-E-03, 11069-000 Rev. H. OMRON Corporation Industrial Automation Company. Kyoto, JAPAN, 2019.
- [8] *Zubehör Programmieradapter Cx für Motion Control System V2.5 Schnittstellen RS232/CAN Artikel Nr.: 6501.00065*. Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG. 2020.
- [9] *Technische Informationen*. 14. Auflage. Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG. Schönaich, DEUTSCHLAND, 2020.
- [10] *Motion Control Systems 71mNm 3564...B Cx*. Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG. 2020.
- [11] *Planetenge triebe 7Nm Serie 32/3*. Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG. 2020.
- [12] *Kommunikations-/ Funktionshandbuch RS232*. 6. Auflage. Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG. Schönaich, DEUTSCHLAND, 2018.
- [13] *Automation Control Environment (ACE) Version 4.0 User's Guide*. I633-E-02, 24000-000 Rev. D. OMRON Corporation Industrial Automation Company. Kyoto, JAPAN, 2019.

- [14] *Automation Control Environment User's Guide*. I603-E-01, 18316-000 Rev A. OMRON Corporation Industrial Automation Company. Kyoto, JAPAN, 2016.
- [15] *eV+ Language Reference Guide*. II605-E-01, 18319-000 Rev A. OMRON Corporation Industrial Automation Company. Kyoto, JAPAN, 2016.
- [16] *Automation Control Environment (ACE) Version 4.0 User's Guide*. I633-E-01, 24000-000 Rev. B. Omron Adept Technologies, Inc. San Ramon, CA USA, 2019.
- [17] *Rahmenordnung für den Betrieb und die Benutzung von Laboren und Werkstätten an der HAW Hamburg*. HAW Hamburg. Hamburg, DEUTSCHLAND, 2015.
- [18] Salzgitter Flachstahl GmbH. *Unlegierte Baustähle*. <https://www.salzgitter-flachstahl.de/de/produkte/warmgewalzte-produkte/stahlsorten/unlegierte-baustaehle.html>. Zugriff: 20.01.2020.
- [19] Abter Group. *ASTM A500 Struktur Carbon Steel Kalt Formed Kreis- und Profilled geschweißte und nahtlose Stahlrohre*. <http://www.abtersteel.com/de/structural-pipe/astm-a500-structural-carbon-steel-cold-formed-circular-profiled-welded-seamless-steel-pipe/>. Zugriff: 20.01.2020. Dez. 2017.
- [20] *PSEN op4F/H-s-...../1 Infrarot- Sicherheitslichtvorhänge Bedienungsanleitung*. Pilz GmbH & Co. KG. Ostfildern, DEUTSCHLAND, 1001422-DE-03.
- [21] *Informationstafel Fritz- Schumacher- Bau Berliner Tor 21*. Informationstafel am Haupteingang vom Berliner Tor 21. Stand: 15.01.2020.
- [22] *DIN EN 1991 Einwirkungen auf Tragwerke- Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke- Wichten, Eigengewicht und Nutzlast im Hochbau; Deutsche Fassung EN 1991-1-1:2002*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, DEUTSCHLAND, 2010.
- [23] *Montage- und Betriebsanleitung MEG 40 EC Elektrischer Parallelgreifer*. 389198-03.00. SCHUNK GmbH & Co. KG Spann- und Greiftechnik. Lauffen/Neckar, DEUTSCHLAND, 2020.
- [24] *Grundlagen der Vakuumtechnik, Kurzübersicht*. 1. Aufl. Festo AG & Co. KG. Esslingen, DEUTSCHLAND, 2019.
- [25] *Vakuumsauggreifer ESG*. Festo AG & Co. KG. Esslingen, DEUTSCHLAND, Aug. 2015.
- [26] *Magnetventile MH2/MH3/MH4, Schnellschaltventile*. Festo AG & Co. KG. Esslingen, DEUTSCHLAND, Jan. 2019.
- [27] *Vakuumsaugdüse VN*. Festo AG & Co. KG. Esslingen, DEUTSCHLAND, Juni 2019.
- [28] *Datenblatt Kunststoffschlauch PUN-6X1-Sl*. Festo AG & Co. KG. Esslingen, DEUTSCHLAND, Apr. 2020.

-
- [29] Hasib Shafaq. persönliches Interview. 05.02.2020.
- [30] Arpa Industriale S.p.A. *Merkmale und Eigenschaften der HPL-Platten*. <https://www.arpaindustriale.com/de/hpl/features#Merkmale>. Zugriff: 29.02.2020.
- [31] Kahrs GmbH. *HPL-Platten: Preiswertes & vielseitiges Verkleidungsmaterial*. <https://blog.holzhandel-deutschland.de/hpl-platten/>. Zugriff: 29.02.2020.
- [32] *DIN EN ISO 12100: 2010 Sicherheit von Maschinen- Allgemeine Gestaltungsleitsätze- Risikobeurteilung und Risikominimierung*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, DEUTSCHLAND, März 2011.
- [33] *Robot Safety Guide*. I590-E-03. Omron Adept Technologies, Inc. USA, 2018.
- [34] *DIN ISO /TS 15066: 2016 Roboter und Robotikgeräte- Kollaborierende Roboter*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, DEUTSCHLAND, Apr. 2017.
- [35] *DIN EN ISO 12100: 2010 Berichtigung 1 Sicherheit von Maschinen- Allgemeine Gestaltungsleitsätze- Risikobeurteilung und Risikominimierung*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, DEUTSCHLAND, Aug. 2013.
- [36] *DIN EN ISO 10218-2: 2011 Industrieroboter- Sicherheitsanforderungen- Teil 2: Robotersysteme und Integration*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, DEUTSCHLAND, Juni 2012.
- [37] *DIN EN ISO 13855: 2010 Sicherheit von Maschinen- Anordnung von Sicherheitseinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, DEUTSCHLAND, Okt. 2010.
- [38] *Calibration Chart for Delta Tron Accelerometer Type 4533-B*. Brüel & Kjær. DÄNEMARK, Juli 2016.
- [39] *Adept XIO Termination Block Installation Guide*. 00340-000, Rev. A. Adept Technology, Inc. CA, USA, Apr. 2004.
- [40] *Adept IO Blox User's Guide*. 04638-000, Rev. C. Adept Technology, Inc. CA, USA, März 2013.

A Anhang zu Kapitel 3

A.1 Zeichnungen des Montagerahmens

1	2	3	4	5	6
Pos.	Menge	Einheit	Benennung	Sachnummer/Norm-Kurzbeschreibung	Bemerkung
1	2	Stk.	Grundplatte des Pfeilers	E1 S335J2	
2	1	Stk.	Grundplatte des UPE-Profiles	E2 S335J2	
3	3	Stk.	Anschlussplatte Pfeiler	E3 S235JR	
4	1	Stk.	Anschlussplatte UPE-Profil	E4 S235JR	
5	4	Stk.	Anschraubplatte 80x80	E5 S235JR	
6	2	Stk.	Anschraubplatte 160x80	E6 S235JR	
7	6	Stk.	Anschraubplatte 250x80	E7 S235JR	
8	3	Stk.	Zylinder	E8 S235JR	
9	1	Stk.	Montageplatte mit Roboterarmauschnitt	E9 S335J2	137,5kg
10	4	Stk.	Hohlprofil- quadratisch	80x80x8, Länge 800 Gehrung 60°-30°, S335JR	EN 10210
11	2	Stk.	Hohlprofil- rechteckig	80x40x8, Länge 800 Gehrung 60°-30°, S235JR	EN 10210
12	1	Stk.	UPE-Profil	UPE120-2081 S235JR	EN 10279
13	2	Stk.	Hohlprofil- quadratisch	80x80x8, Länge 2085 S335JR	EN 10210
14	1	Stk.	Hohlprofil- quadratisch	80x80x8, Länge 940 S335JR	EN 10210
15	2	Stk.	Hohlprofil- quadratisch	80x80x8, Länge 2645 S335JR	EN 10210
16	4	Stk.	Hohlprofil- quadratisch	80x80x8, Länge 1780 S335JR	EN 10210
17	2	Stk.	Hohlprofil- quadratisch	80x80x8, Länge 1350 S335JR	EN 10210
18	4	Stk.	Hohlprofil- quadratisch	80x80x8, Länge 566 Gehrung 45°-45°, S335JR	EN 10210

1	2	3	4	5	6
Pos.	Menge	Einheit	Benennung	Sachnummer/Norm-Kurzbeschreibung	Bemerkung
19	1	Stk.	Hohlprofil- quadratisch	80x80x8, Länge 217 S335JR	EN 10210
20	1	Stk.	Hohlprofil- quadratisch	80x80x8, Länge 203 S335JR	EN 10210
21	1	Stk.	Hohlprofil- quadratisch	80x80x8, Länge 150 S335JR	EN 10210
22	4	BG	Strebe 80x80 mit Anschraubplatte	G1	13,4kg
23	1	BG	Strebe 80x40 Links mit Anschraubplatte	G2	9,9kg
24	1	BG	Strebe 80x40 Rechts mit Anschraubplatte	G3	9,9kg
25	1	BG	UPE-Profil Pfeiler	G4	32,3kg
26	1	BG	Pfeiler Links	G5	67,5kg
27	1	BG	Pfeiler Rechts	G6	67,1kg
28	1	BG	Pfeiler Kurz	G7	44,8kg
29	1	BG	Montageplatte mit Zylinder	G8	146,6kg
30	1	BG	Profiltragwerk	G9	319,3kg
31	12	Stk.	Zylinderschraube M16 mit Innensechskant	ISO 4762 - M16 x25 - 8.8	
32	20	Stk.	Sechskantschraube M12	ISO 4017 - M12 x 25 - 8.8	
Verantwortl. Abtlg. ICAMM		Technische Referenz Bachelorthesis		Erstellt durch Emma Streng	Genehmigt von -
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences		Dokumentenart Stückliste		Dokumentenstatus freigegeben	
		Titel, Zusätzlicher Titel Montagerahmen		gültig für die Zeichnungsnummern: G1- G9, Z1	
		Änd.	Ausgabedatum	Spr.	Blatt
	A	25.03.20	de	2/2	

ABBILDUNG A.1: Stückliste Montagerahmen

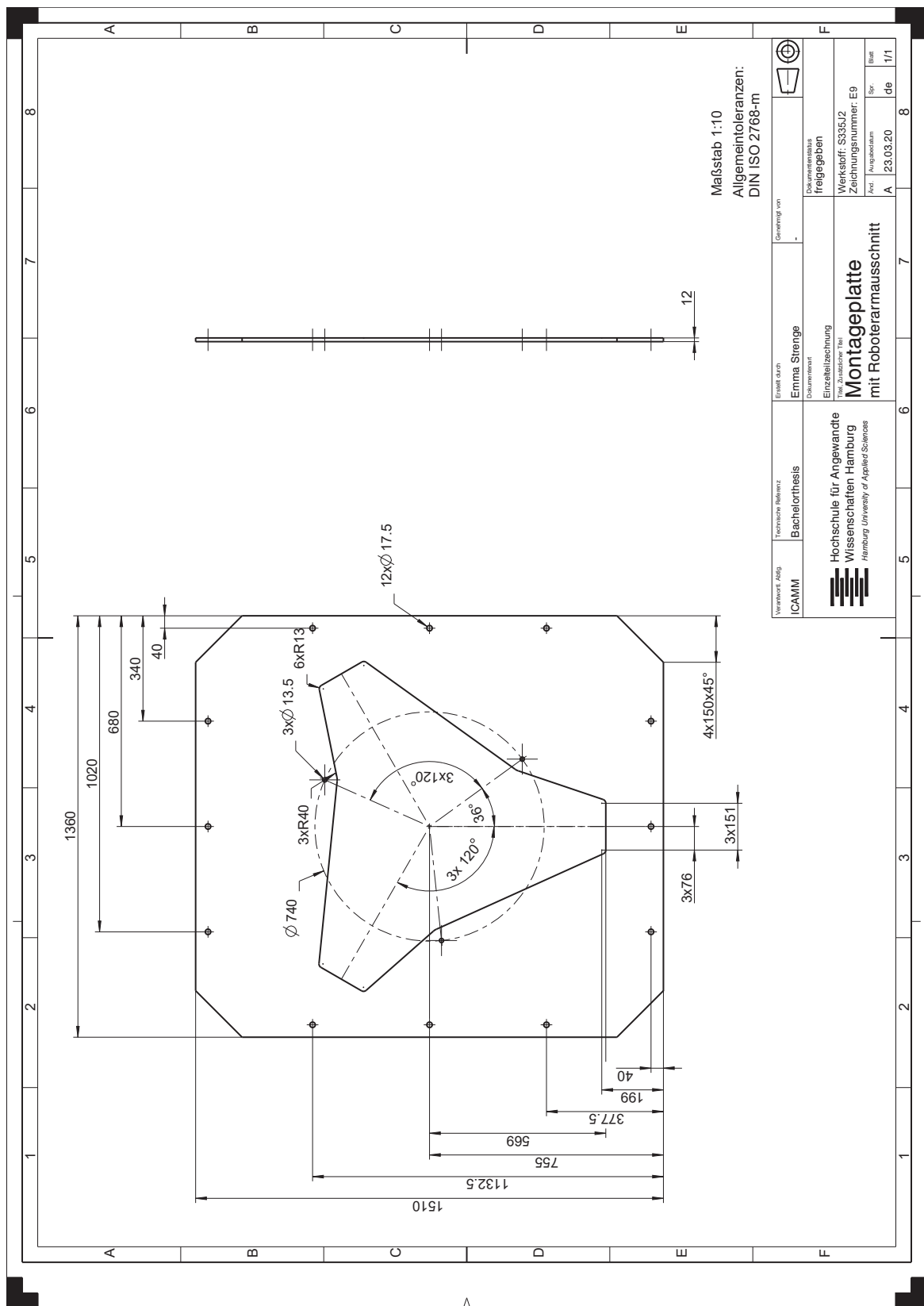


ABBILDUNG A.2: Zeichnung E9 Montageplatte mit Roboterarmausschnitt

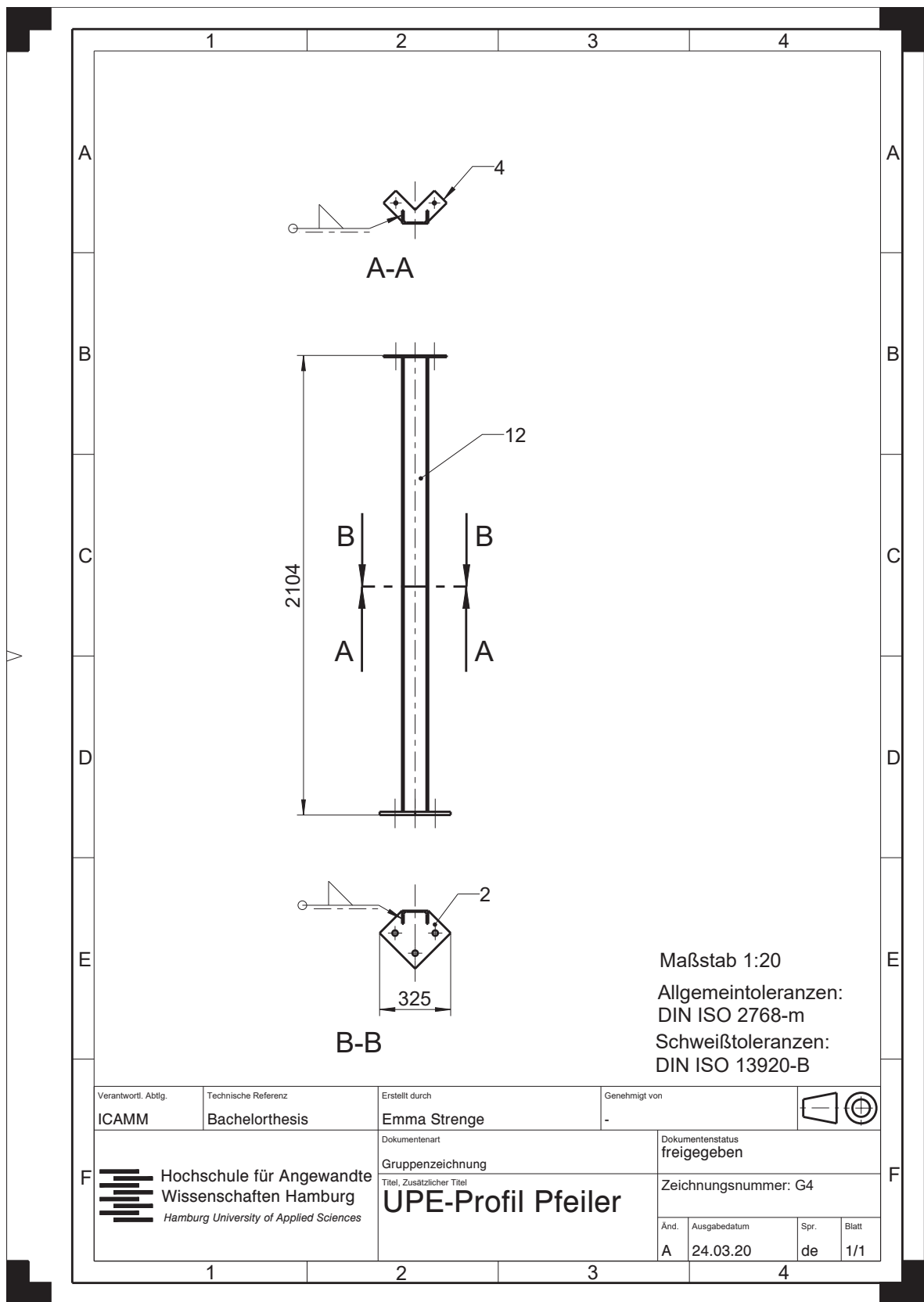


ABBILDUNG A.3: Zeichnung G4 UPE-Profil Pfeiler

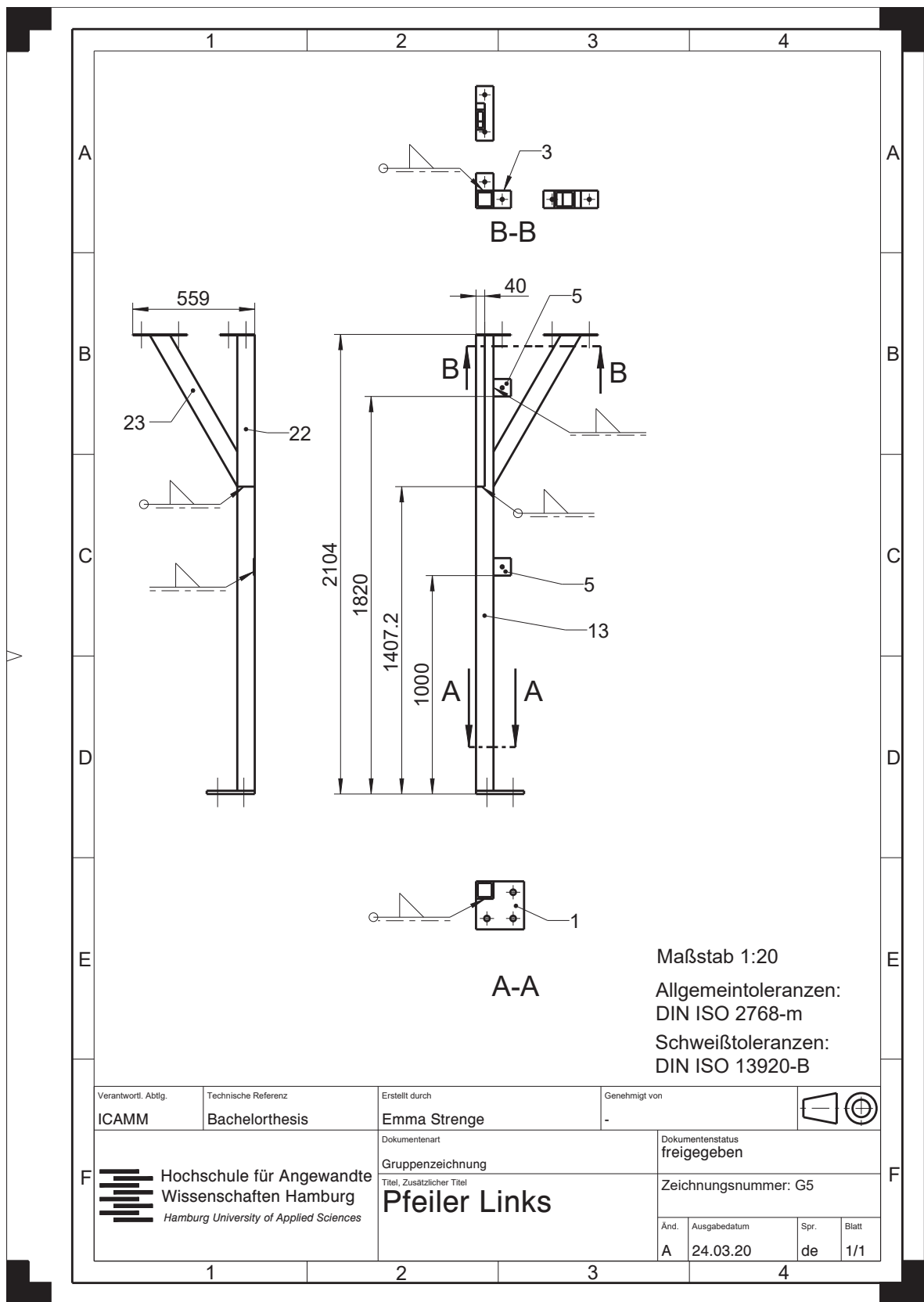


ABBILDUNG A.4: Zeichnung G5 Pfeiler Links

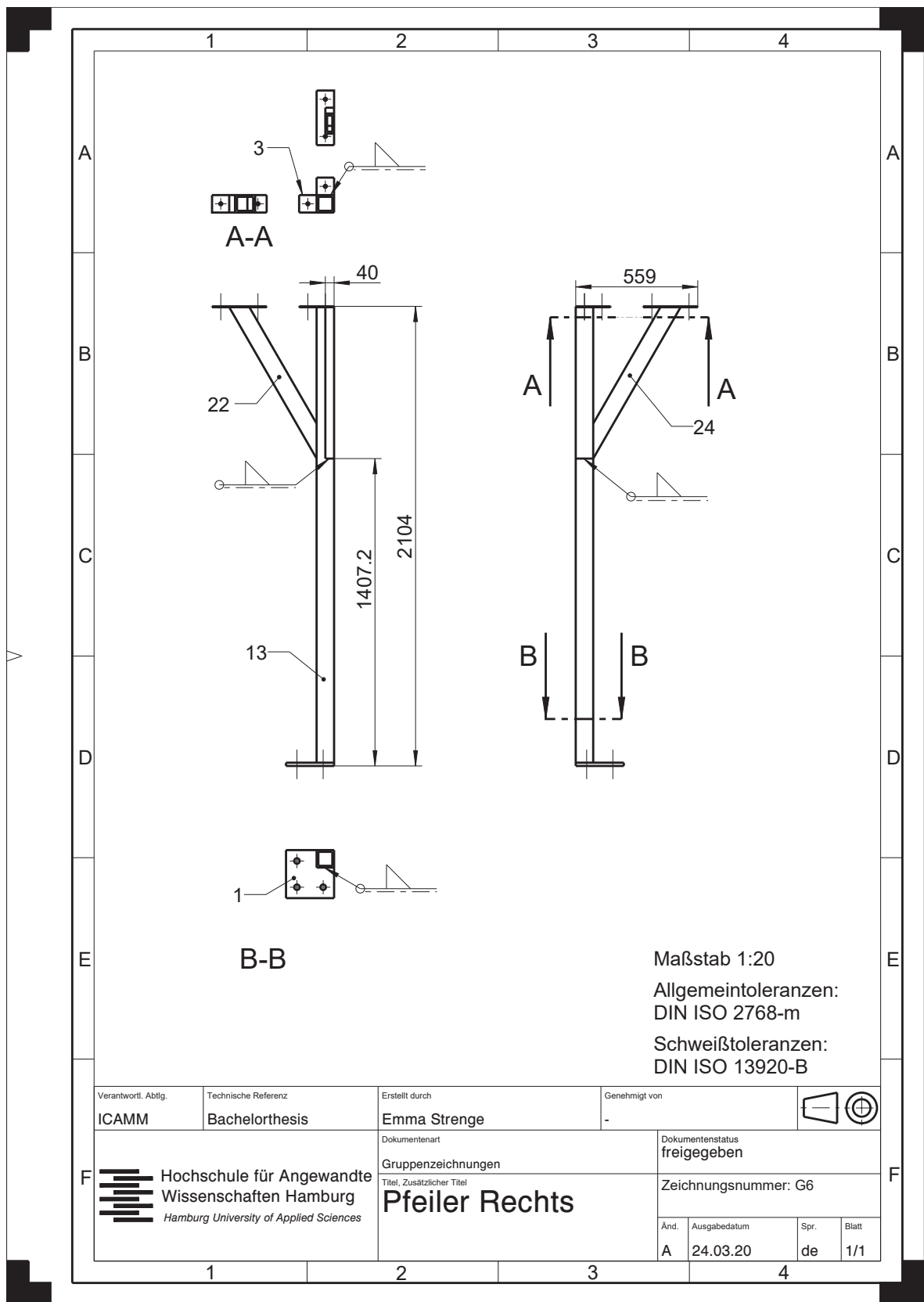


ABBILDUNG A.5: Zeichnung G6 Pfeiler Rechts

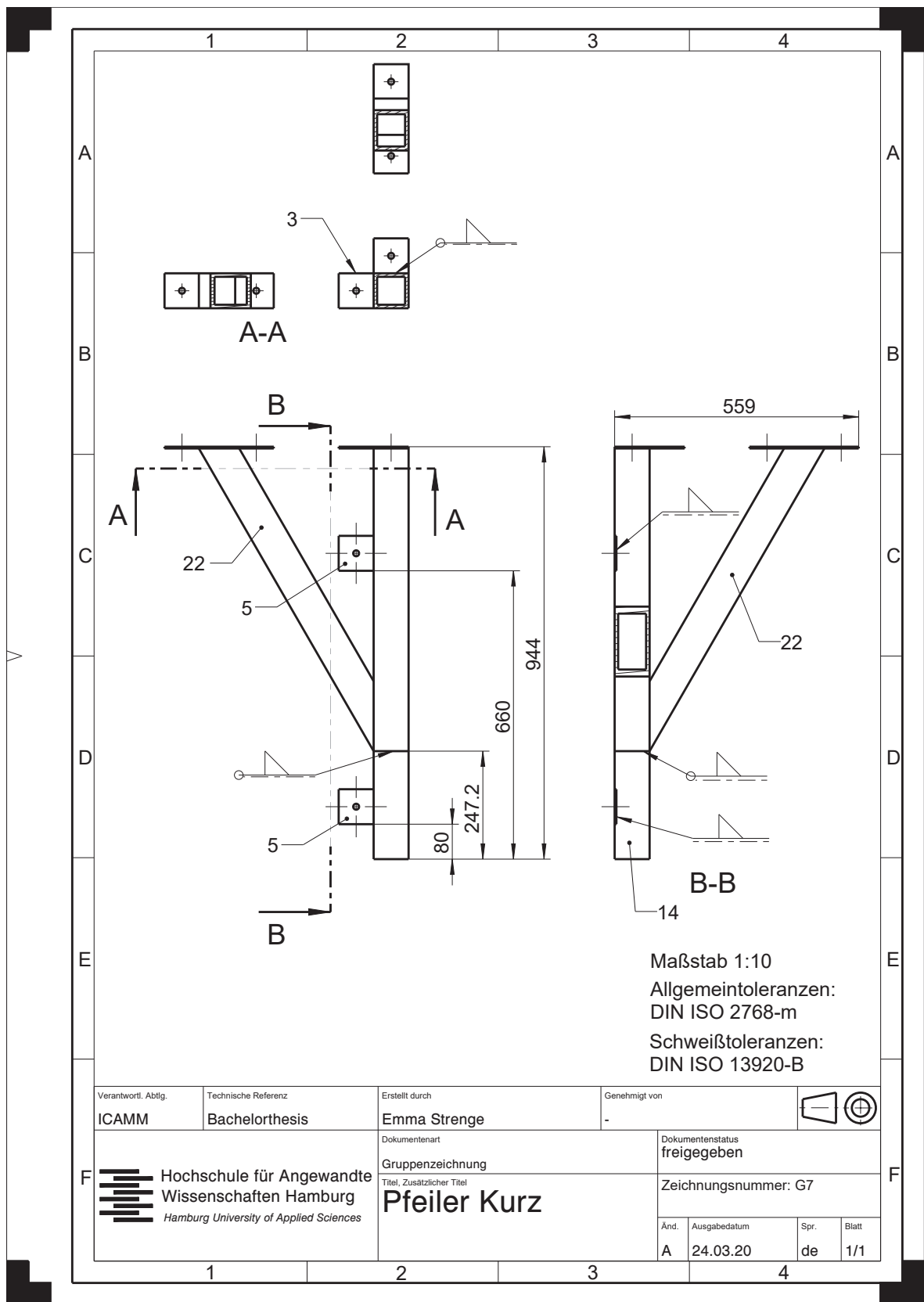


ABBILDUNG A.6: Zeichnung G7 Pfeiler Kurz

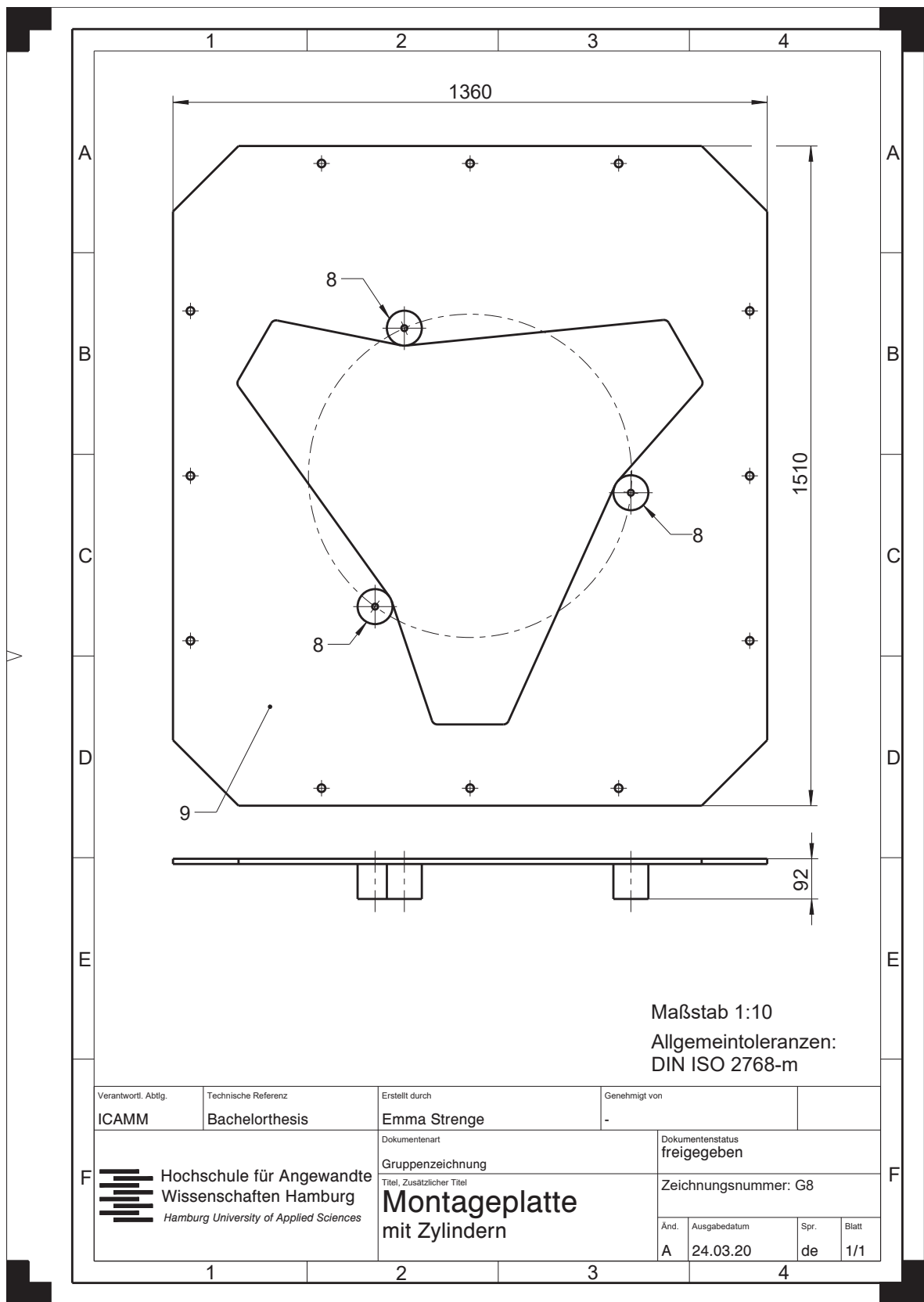


ABBILDUNG A.7: Zeichnung G8 Montageplatte mit Zylinder

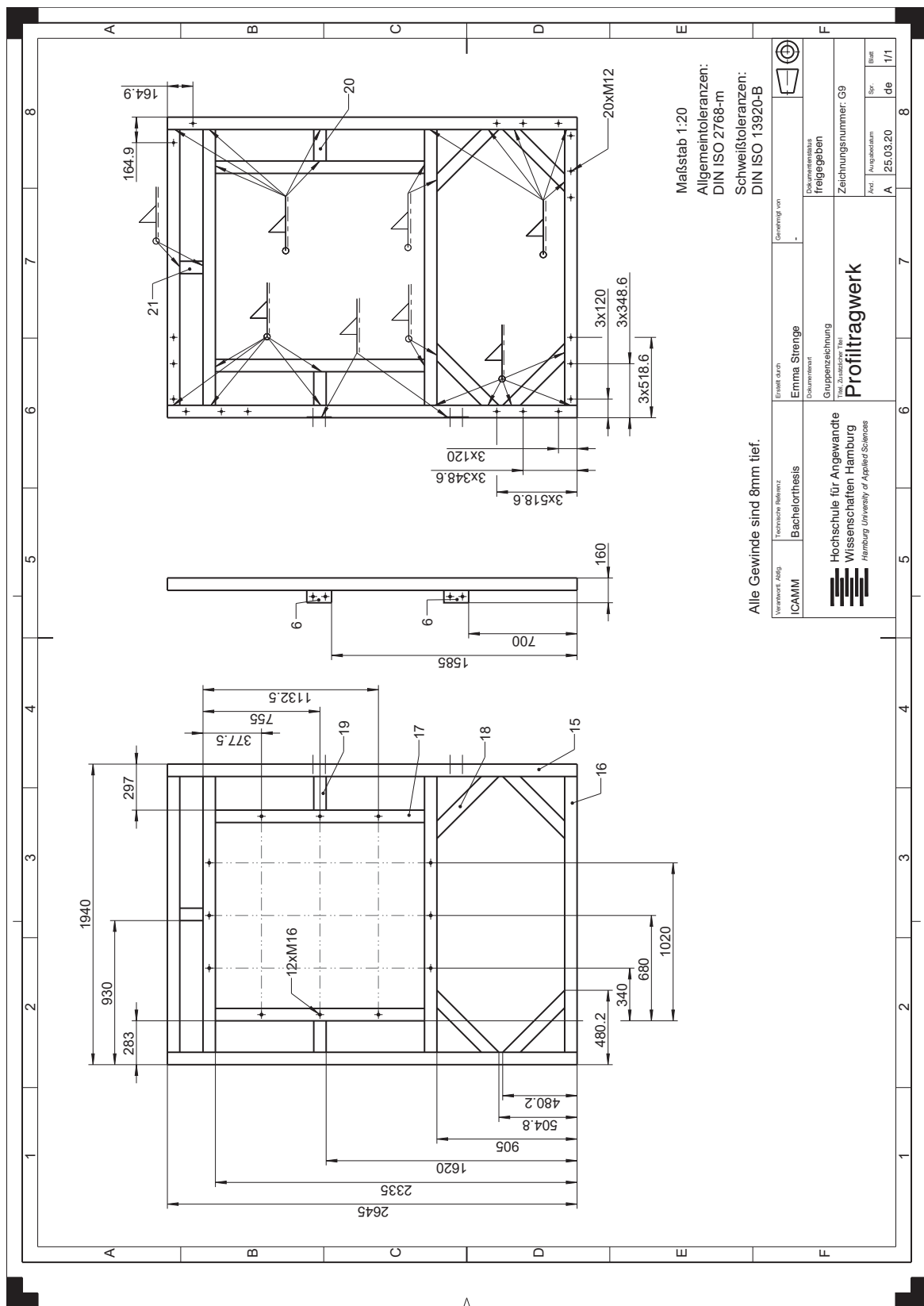


ABBILDUNG A.8: Zeichnung G9 Profiltragwerk

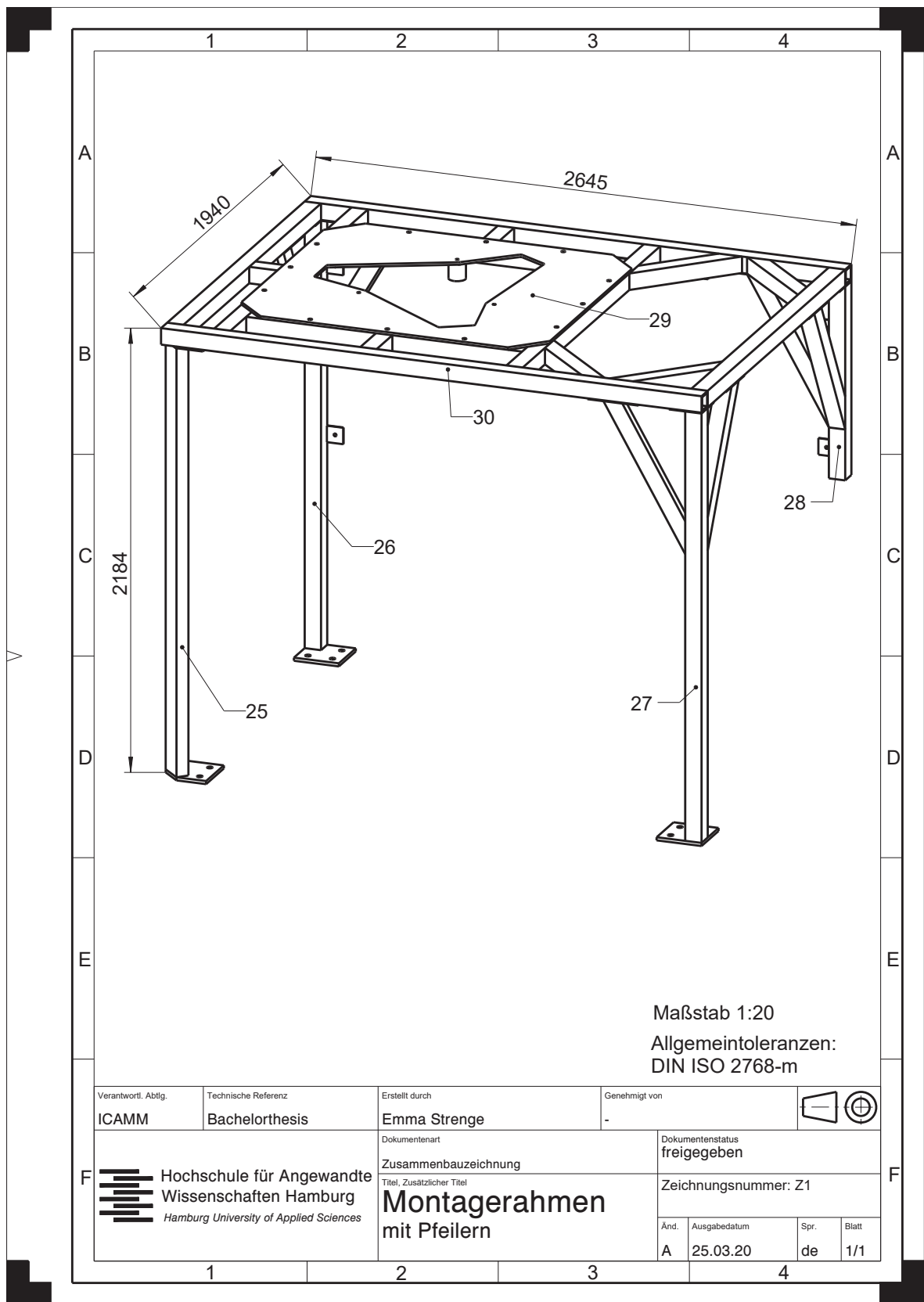


ABBILDUNG A.9: Zeichnung Z1 Montagerahmen

A.2 Frequenzmessungen am Montagerahmens

Produkt	Typ	Seriennummer	Referenzsensitivität	Anschlussbelegung am Eingangsmodul
12-Kanal High Density Eingangsmodul	3053-B-120	106196	-	-
Schlaghammer	8206-002	57253	$2,140 \text{ mV N}^{-1}$	12
Beschleunigungsaufnehmer	4533-B	31576	$1,014 \text{ mV ms}^{-2}$	5
Beschleunigungsaufnehmer	4533-B	31577	$0,9458 \text{ mV ms}^{-2}$	6
Beschleunigungsaufnehmer	4533-B	31578	$1,011 \text{ mV ms}^{-2}$	7
Beschleunigungsaufnehmer	4533-B	31579	$1,071 \text{ mV ms}^{-2}$	8
Beschleunigungsaufnehmer	4533-B	31580	$0,9866 \text{ mV ms}^{-2}$	9
Beschleunigungsaufnehmer	4533-B	31581	$1,072 \text{ mV ms}^{-2}$	10
Beschleunigungsaufnehmer	4533-B	31582	$1,066 \text{ mV ms}^{-2}$	11

TABELLE A.1: Komponentenübersicht für die Frequenzmessung (in Anlehnung an [38]).

B Anhang zu Kapitel 4

B.1 Elektrischer Parallelgreifer MEG 40 EC

Klemmbelegung

Klemme	Funktion	Sonstiges	Kabelfarbe
1	Anschluss 3 Motor	Anschluss für MEG 40 EC	Blau
2	Schirm (Greifanschlusskabel PE)	Anschluss für MEG 40 EC	
3	Anschluss 4 Motor	Anschluss für MEG 40 EC	Schwarz
4			
5			
6	GND für Positionsausgabe	GND Analoger Ausgang	
7	Anschluss 1 Motor	Anschluss für MEG 40 EC	Braun
8			
9	Anschluss 2 Motor	Anschluss für MEG 40 EC	Weiß
10	Versorgung (+24V)	24 VDC \pm 2 %	
11	Externer Reset	Digitaler Eingang	
12	Versorgung (GND)	GND	
13	Greifer steht	Digitaler Ausgang	
14	Referenzfahrt durchgeführt	Digitaler Ausgang	
15	Analoge Positionsausgabe (0- 5 V)	Digitaler Ausgang	
16	24 V SPS	24 VDC \pm 2 %	
17	GND SPS	GND, Potential von SPS	
18	Soll- Position erreicht	Digitaler Ausgang	
19	Referenzfahrt	Digitaler Eingang	
20	Greifer Zu	Digitaler Eingang	
21	Greifer Auf	Digitaler Eingang	
22	Analogeingang Geschwindigkeit	0 V- 10 V (zum GND SPS)	
23	Analogeingang Schritte	0 V- 10 V (zum GND SPS)	
24	Analogeingang Kraft	0 V- 10 V (zum GND SPS)	

TABELLE B.1: Klemmbelegung am Controller MEG C 40. [23]

Einstellmöglichkeiten

Geschwindigkeit in mm/s Geschwindigkeit = f [Eingangsspannung] am Potentiometer

$$y = 0,64x + 6,51$$

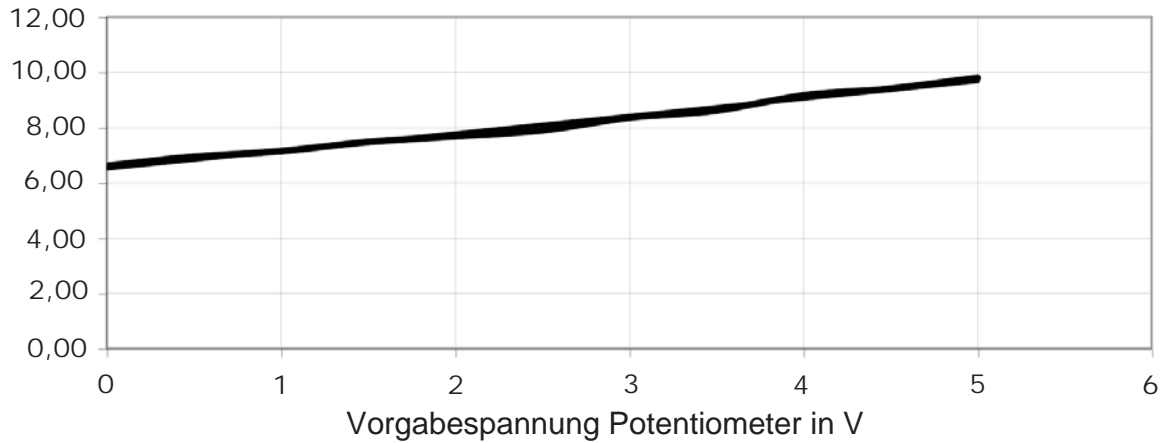


ABBILDUNG B.1: Diagramm Geschwindigkeitseinstellung am Controller MEG C 40 [23].

Weg in mm Wegvorgabe = f [Eingangsspannung] am Potentiometer

$$y = 1,22x - 0,012$$

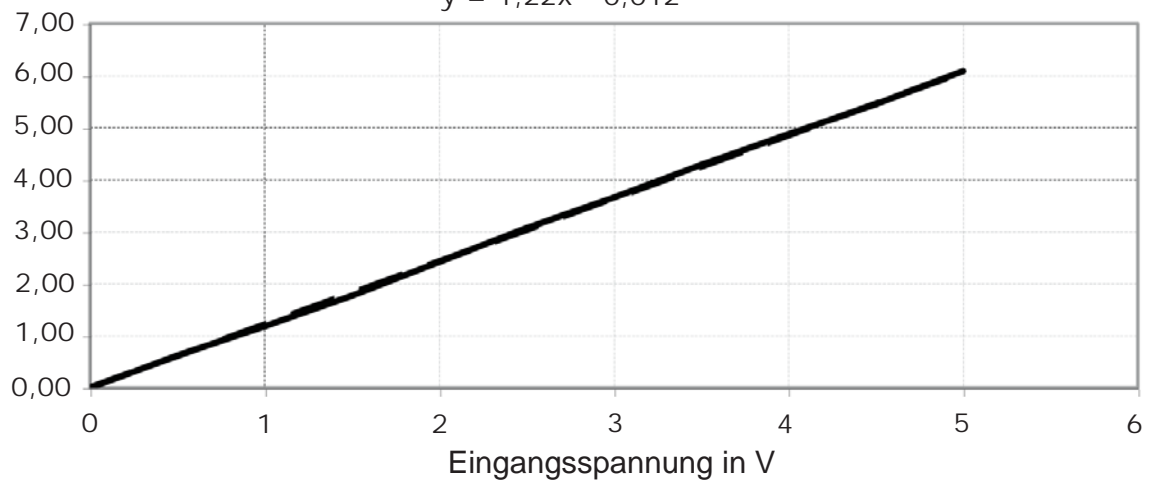


ABBILDUNG B.2: Diagramm Hubeinstellung am Controller MEG C 40 [23].

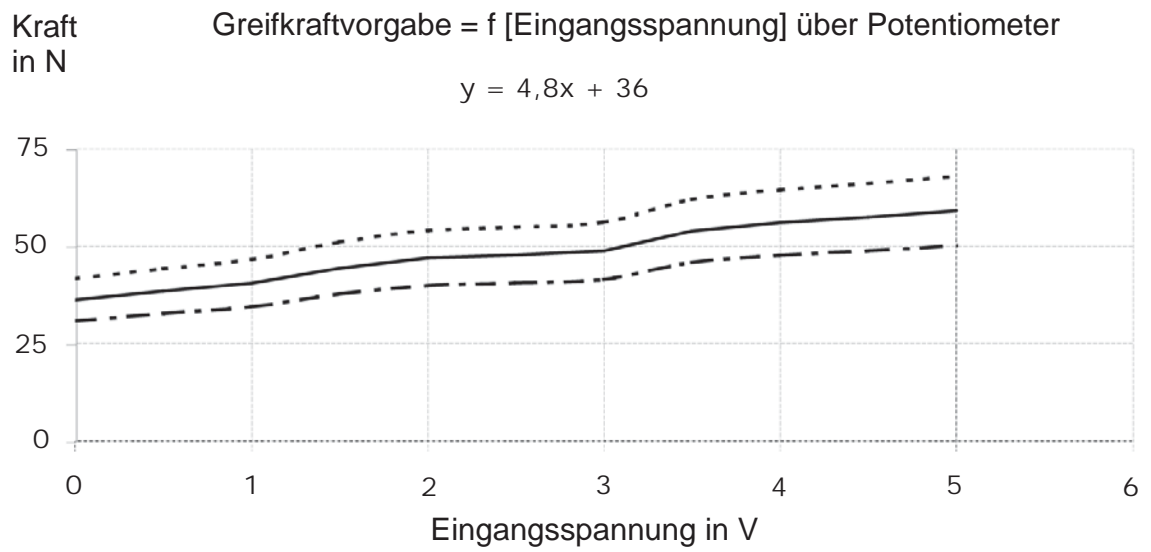


ABBILDUNG B.3: Diagramm Greifkrafteinstellung am Controller MEG C 40 [23].

B.2 Sauggreifsystem

Auslegen des Saugers

Entsprechend Tabelle 4.4 ist ein Auslegen des Sauggreifers nach den vorhandenen Fällen notwendig. Fall 1 und Fall 2 bilden die möglichen Bewegungsfälle des Saugers ab. Fall 3 ist aufgrund der Bauweise des Roboters nicht möglich. Fall 1 ist mit Gleichung 4.1 und Fall 2 mit Gleichung 4.2 berechenbar. Für das Berechnen der Abreißkraft ist Gleichung 4.3 zu verwenden. Für das Berechnen des Saugers sind folgende Werte anzunehmen:

Reibungskoeffizient:	$\mu = 0,5$, für konventionelle Oberflächen aus Metall, Kunststoff etc.[24]
Sicherheitswert:	$S = 1,5$, für unkritische, homogene Werkstoffe[24]
Gravitationskraft:	$g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$	
Anzahl der Sauger:	$n = 1$	
Beschleunigung:	$a = 54 \text{ m s}^{-2}$, entsprechend der empfohlenen Beschleunigung für eine Traglast am TCP von 0,1 kg [6]

Auslegen des Saugers auf die maximale Objektmasse: $m = 0,0382 \text{ kg}$

$$\begin{aligned} \text{Fall 1: } F_H &= 0,0382 \text{ kg} \cdot (9,81 \text{ m s}^{-2} + 54 \text{ m s}^{-2}) \cdot 1,5 \\ &= 3,66 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Fall 2: } F_H &= 0,0382 \text{ kg} \cdot \left(9,81 \text{ m s}^{-2} + \frac{54 \text{ m s}^{-2}}{0,5}\right) \cdot 1,5 \\ &= 6,75 \text{ N, maßgebender Fall} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Abreißkraft: } F_A &= \frac{6,75 \text{ N}}{1} \\ &= 6,75 \text{ N} \end{aligned}$$

In Abwägung der benötigten Abreißkraft und den Eigenschaften der Objekte wird ein runder Sauger in der flachen Standardausführung mit einem Durchmesser von 15 mm und einer Abreißkraft von 8,5 N bei $-0,7 \text{ bar}$ ausgewählt (vgl. Abbildung B.4).

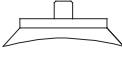
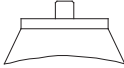

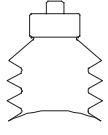
Abreißkraft F_A in Abhängigkeit von Sauger- \emptyset und Saugerform					
Sauger rund		F_A bei $-0,7$ bar			
Bestell- angaben	Sauger- \emptyset [mm]	Standard 	extratief 	Faltenbalg 1,5fach 	Faltenbalg 3,5fach 
ess	2	0,1 N			
	4	0,4 N			
	6	1,1 N			
	8	2,3 N			
	10	3,9 N		4,7 N	3,9 N
	15	8,5 N	9,8 N		
	20	16,3 N	17 N	12,9 N	8,2 N
	30	40,8 N	37,2 N	26,2 N	20,8 N
	40	69,6 N	67,6 N	52,3 N	42,4 N
	50	105,8 N	103,6 N	72,6 N	63,4 N
	60	166,1 N	162,5 N		
	80	309,7 N	275 N	213,9 N	
	100	503,6 N	440,8 N		
	150	900 N			
200	1 610 N				

ABBILDUNG B.4: Abreißkraft in Abhängigkeit von Saugerdurchmesser und -form [24].

Durch Umstellen der Gleichung 4.2 wird die kritische Beschleunigung a_{krit} mittels Gleichung 5.1 berechnet.

$$\begin{aligned}
 a_{krit} &= \left(\frac{8,5 \text{ N}}{0,0382 \text{ kg} \cdot 1,5} - 9,81 \text{ m s}^{-2} \right) \cdot 0,5 \\
 &= 69,3 \text{ m s}^{-2}
 \end{aligned}$$

Die kritische Beschleunigung für den 38,2 g schweren Quader liegt bei $69,3 \text{ m s}^{-2}$. Infolge der benötigten Haltekraft und der damit einhergehenden Größe des Saugers, entfallen die 2x2 Lego® Duplo® Steine bei diesem Sauger.

Alternative Auslegung für Einzelanwendungen mit dem 2x2 Lego® Duplo® Stein: $m = 0,0063 \text{ kg}$

$$\begin{aligned} \text{Fall 1: } F_H &= 0,0063 \text{ kg} \cdot (9,81 \text{ m s}^{-2} + 54 \text{ m s}^{-2}) \cdot 1,5 \\ &= 0,60 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Fall 2: } F_H &= 0,0063 \text{ kg} \cdot (9,81 \text{ m s}^{-2} + \frac{54 \text{ m s}^{-2}}{0,5}) \cdot 1,5 \\ &= 1,11 \text{ N, maßgebender Fall} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Abreißkraft: } F_A &= \frac{1,11 \text{ N}}{1} \\ &= 1,11 \text{ N} \end{aligned}$$

Entsprechend der Abbildung B.4 wird ein runder flacher Standardsauger mit einem Durchmesser von 10 mm und einer Abreißkraft von 3,9 N bei $-0,7 \text{ bar}$ ausgewählt. Der Sauger hat ausreichend Platz zwischen den Noppen des Lego® Duplo® Steins. Die kritische Beschleunigung dieses Objektes liegt bei $201,4 \text{ m s}^{-2}$.

$$\begin{aligned} a_{krit} &= (\frac{3,9 \text{ N}}{0,0063 \text{ kg} \cdot 1,5} - 9,81 \text{ m s}^{-2}) \cdot 0,5 \\ &= 201,4 \text{ m s}^{-2} \end{aligned}$$

Auslegung der Vakuumsaugdüse

Die Auswahl der Vakuumsaugdüse wird über die Evakuierungszeit ermittelt. Die Evakuierungszeit berechnet sich über die Gleichung 4.4. Das Gesamte zu evakuierende Volumen setzt sich wie folgend zusammen:

Die Evakuierungszeit für 1000 cm^3 bei 6 bar ist Abbildung B.5 zuzunehmen. Es ist ein Druck von $-0,7 \text{ bar}$ zu erreichen, da hierfür die Abreißkraft des Saugers vorliegt. Für die Vakuumsaugdüse VN-14-H ergibt sich eine Evakuierungszeit t_{E1} von $1,5 \text{ s}$.

$$\begin{aligned} t_E &= 23,462 \text{ cm}^3 \cdot \frac{1,5 \text{ s}}{1000 \text{ cm}^3} \\ t_E &= 0,035 \text{ s} \end{aligned}$$

Komponente	Berechnung des Volumens	Volumen [cm ³]
Kunststoffschlauch 6 mm	$\frac{\pi}{4} \cdot (0,4 \text{ cm}^3)^2 \cdot 120 \text{ cm}$	15,079
Kunststoffschlauch 8 mm	$\frac{\pi}{4} \cdot (0,6 \text{ cm}^3)^2 \cdot 20 \text{ cm}$	5,655
Halter Größe 3		0,502
Sauger 15 mm		0,208
Magnetventil		2,000*
Gesamtes Volumen V_G		23,462

[*] Schätzwert

TABELLE B.2: Gesamtes zu evakuierendes Volumen Verweis (in Anlehnung an [25])

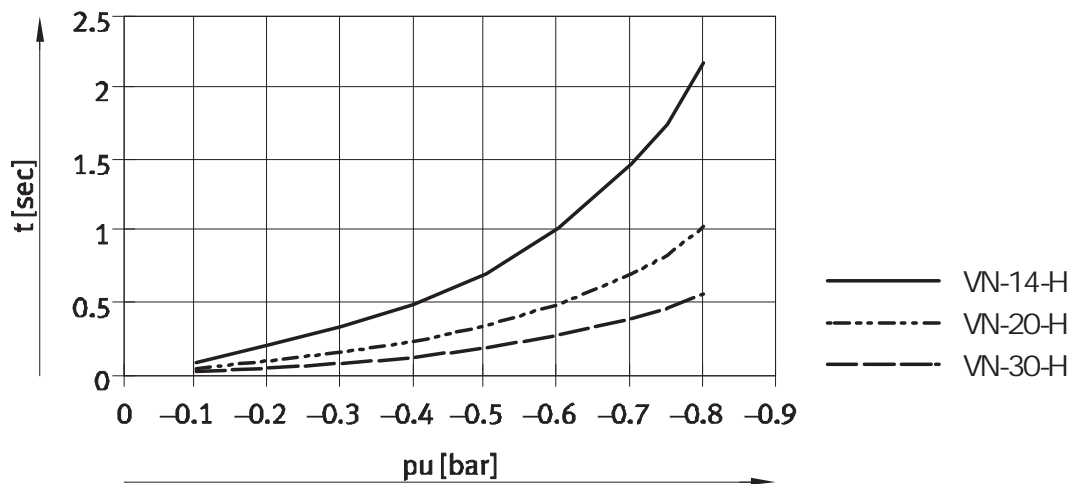


ABBILDUNG B.5: Diagramm zum Ermitteln der Evakuierungszeit t_{E1} in Abhängigkeit vom Vakuum p_u für 11 Volumen bei 6 bar Betriebsdruck der Vakuumsaugdüse [27]

Für das Gesamte zu evakuierende Volumen ergibt sich eine Evakuierungszeit t_E von 0,0035 s. Die Deevakuierungszeit pro 1000 cm³ bei 6 bar Betriebsdruck entspricht 0,5 s für eine VN-14-H Vakuumsaugdüse mit elektrischem Einschaltventil M (vgl. Abbildung B.6). Die Deevakuierungszeit für das gesamte Volumen beträgt 0,011 s.

$$t_B = 23,462 \text{ cm}^3 \cdot \frac{0,5 \text{ s}}{1000 \text{ cm}^3}$$

$$t_B = 0,011 \text{ s}$$

Leistungsdaten – Hohes Vakuum				
Ejektor-Charakteristik		Standard H		
Nennweite Lavaldüse	[mm]	1,4		
Integrierte Funktion		A	M	B
Max. Vakuum	[%]	92		
Betriebsdruck für max. Vakuum	[bar]	3,5		
Max. Saugvolumenstrom gegen Atmosphäre		48,8		
Betriebsdruck für max. Saugvolumenstrom	[bar]	4		
Belüftungszeit bei Nennbetriebsdruck 6 bar (für 1 l Volumen) ¹⁾		0,43	0,5	
Schalldruckpegel bei Nennbetriebsdruck 6 bar		69		

1) Dauer für den Vakuumabbau bis zu einem Restvolumen von -0,05 bar nach Abschalten des Betriebsdrucks

ABBILDUNG B.6: Datenblatt der Vakuumsaugdüse VN-14-H-T4-PQ3-VQ3-R02-M [27]

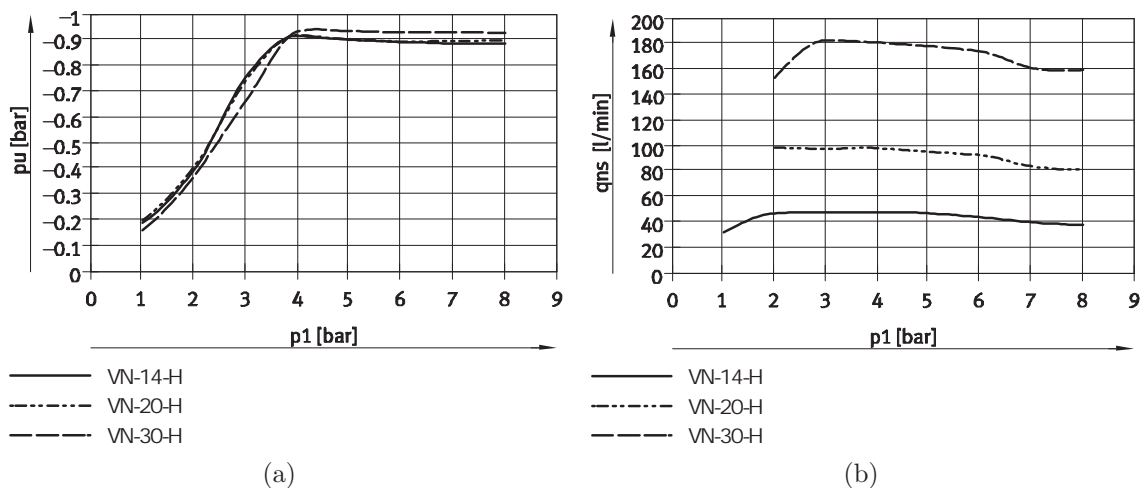


ABBILDUNG B.7: Eigenschaften der Vakuumsaugdüse in Abhängigkeit vom Betriebsdruck p_1 . (a) Vakuum p_u (b) Saugvolumenstrom q_{ns} (gegen Atmosphäre) [27]

Adapterplatte des Sauggreifers

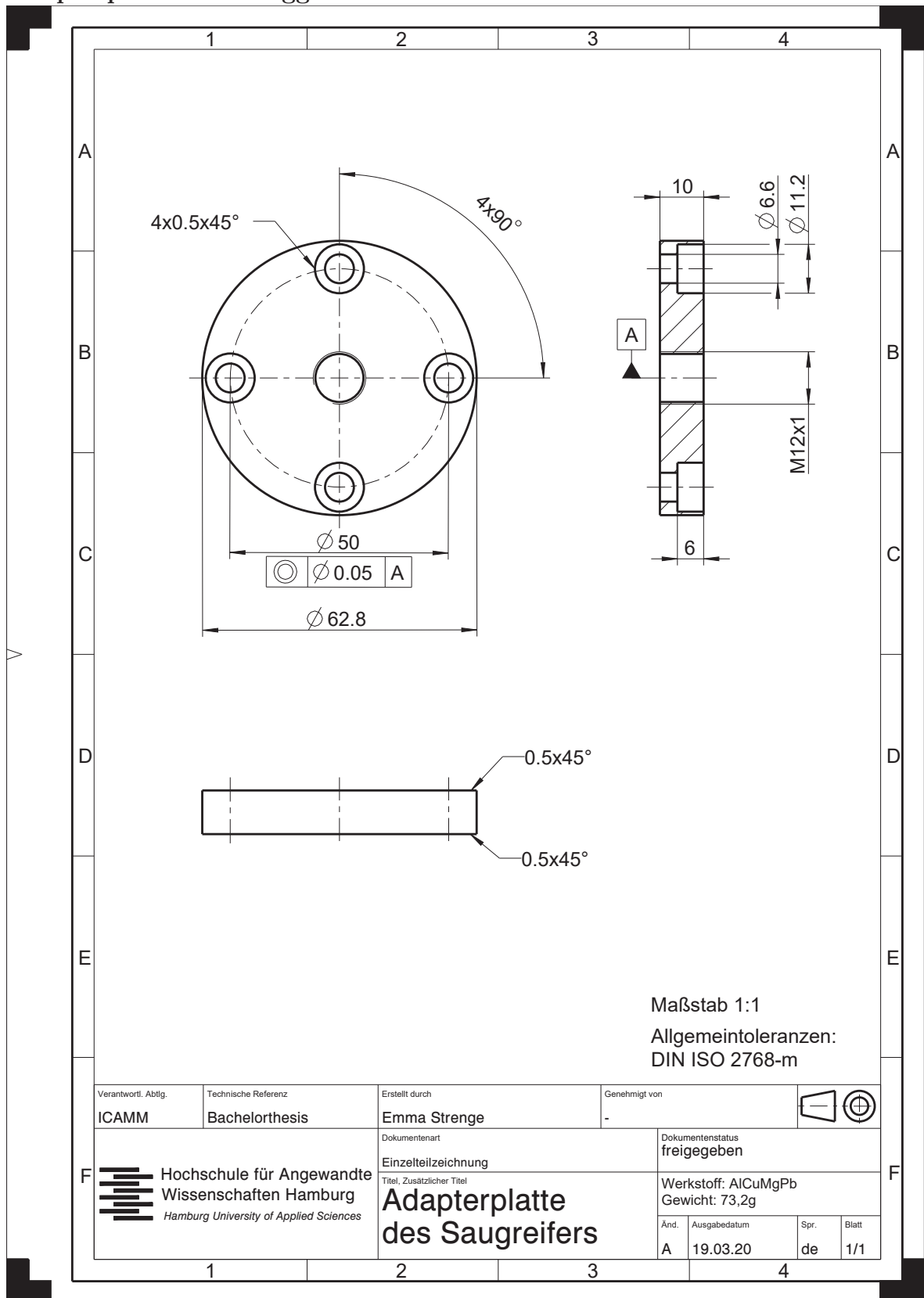


ABBILDUNG B.8: Zeichnung Adapterplatte des Sauggreifers

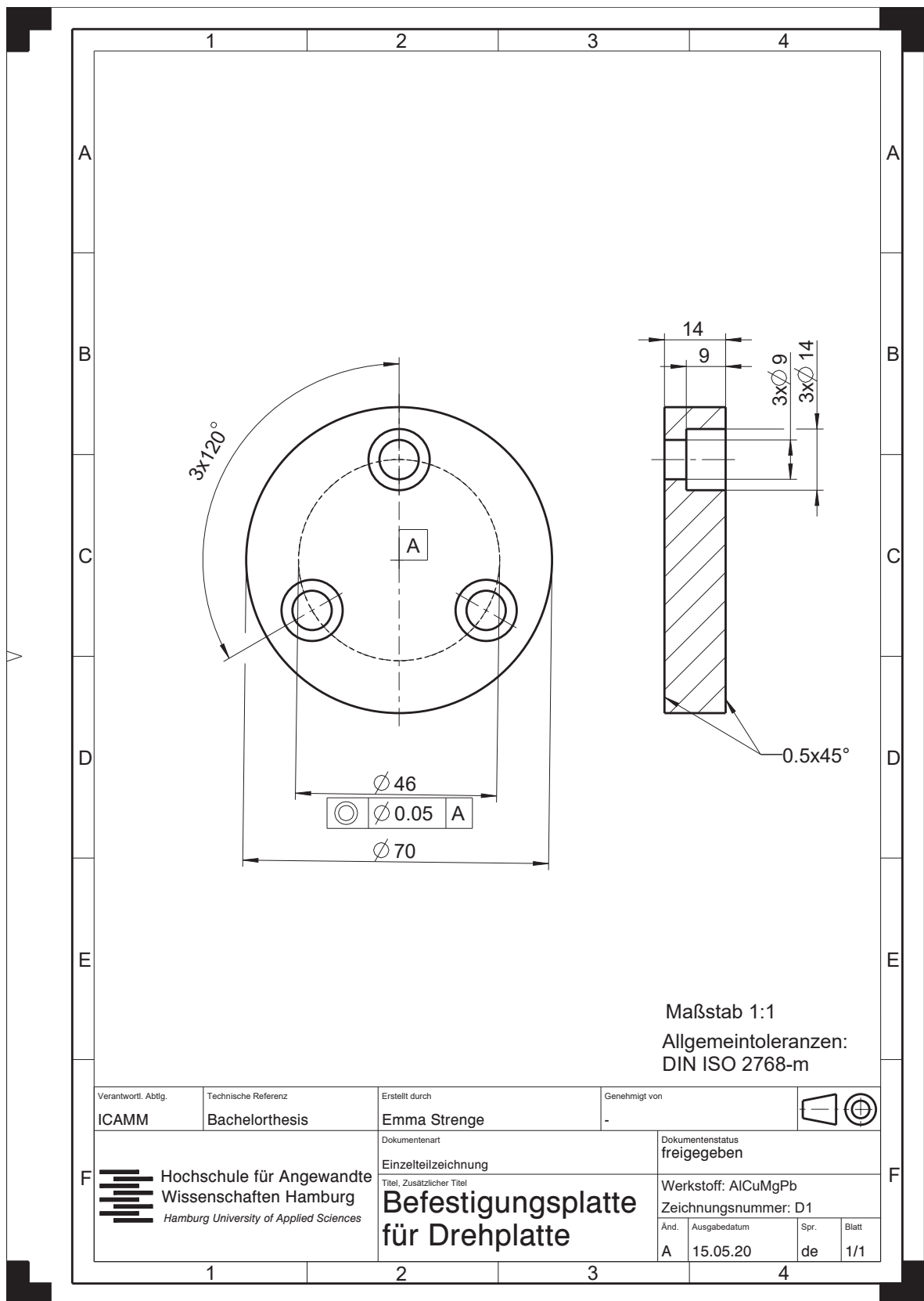


ABBILDUNG B.10: Zeichnung D1 Befestigungsplatte für Drehplatte

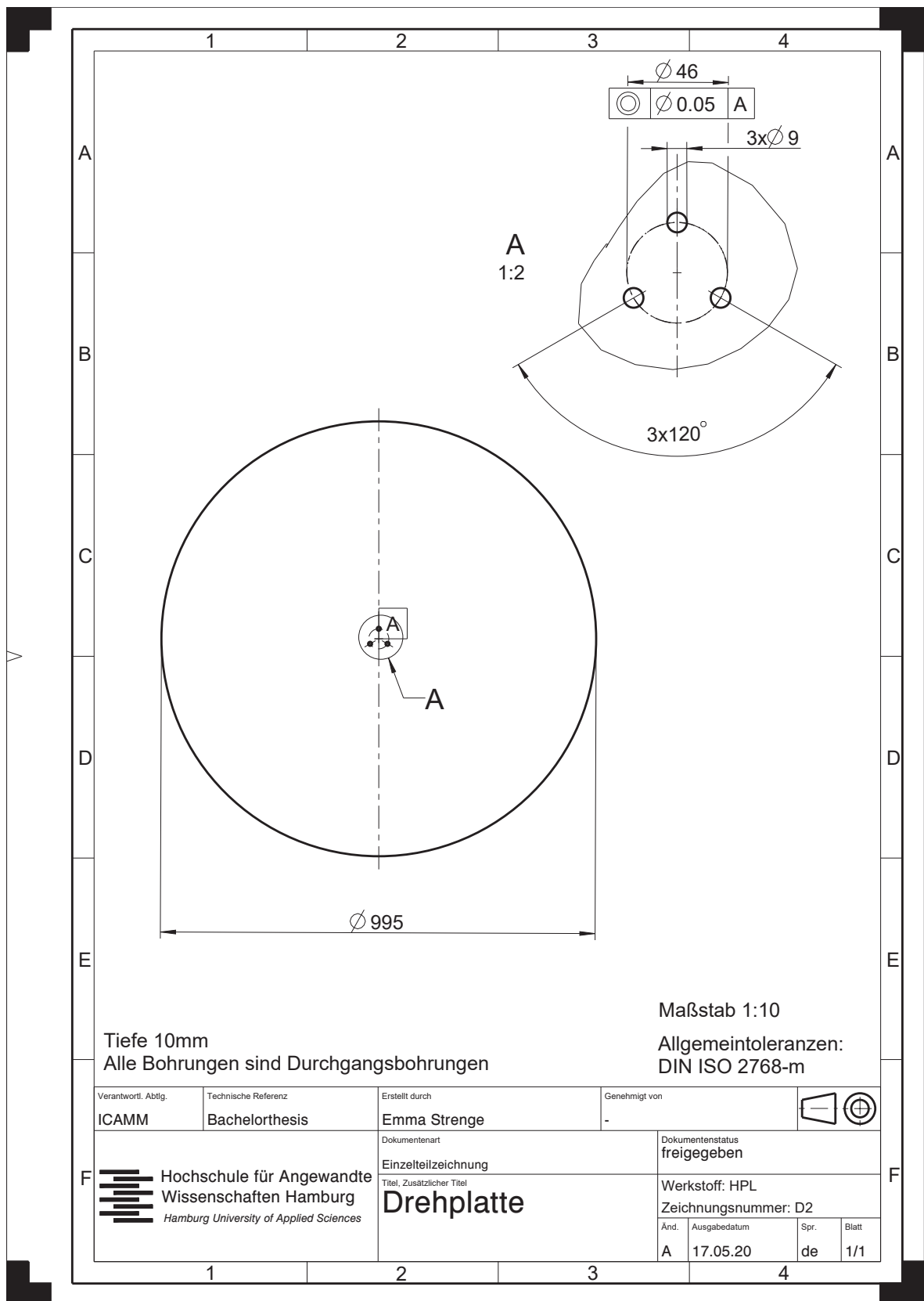


ABBILDUNG B.11: Zeichnung D2 Drehplatte

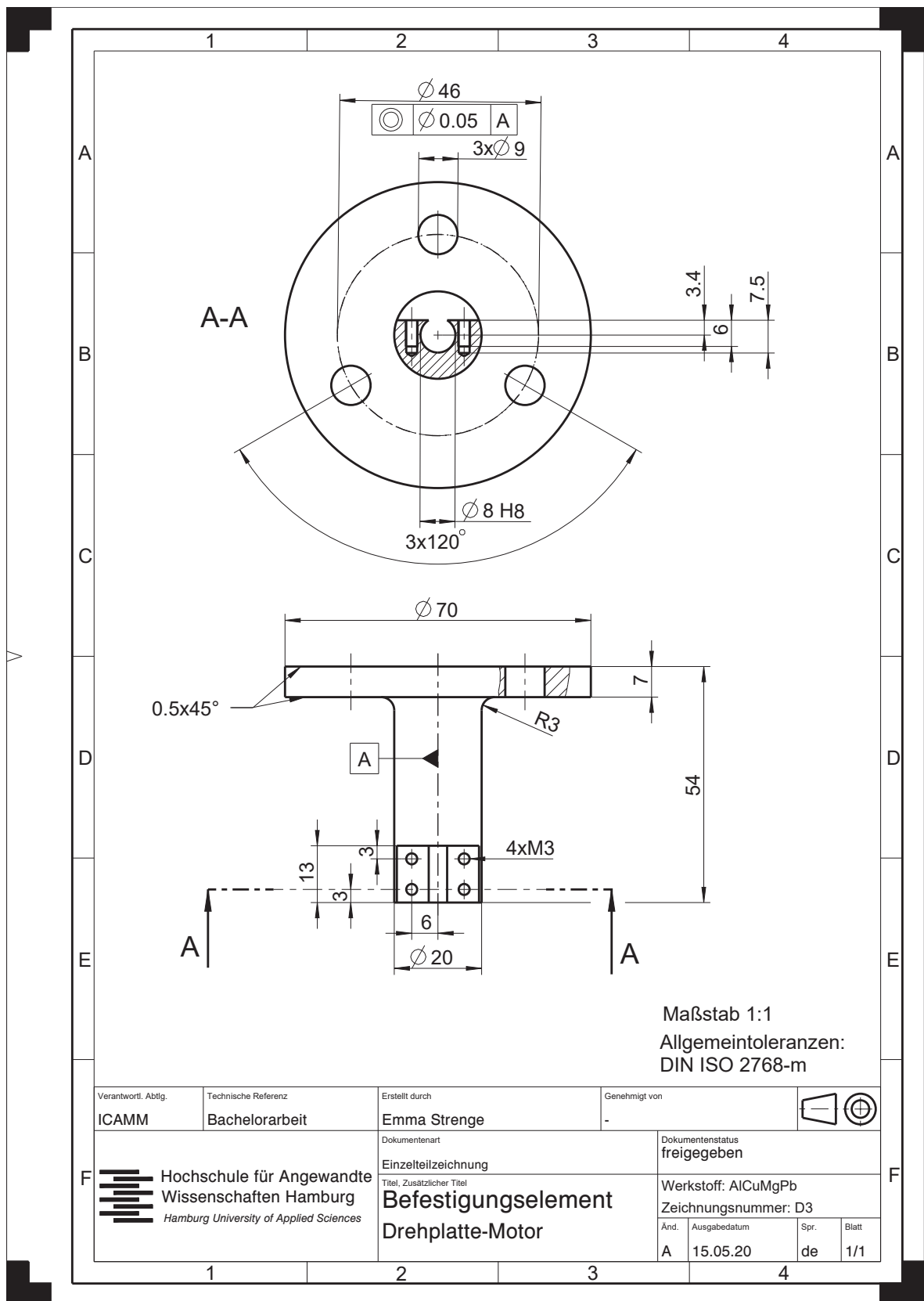


ABBILDUNG B.12: Zeichnung D3 Befestigungselement Drehplatte- Motor

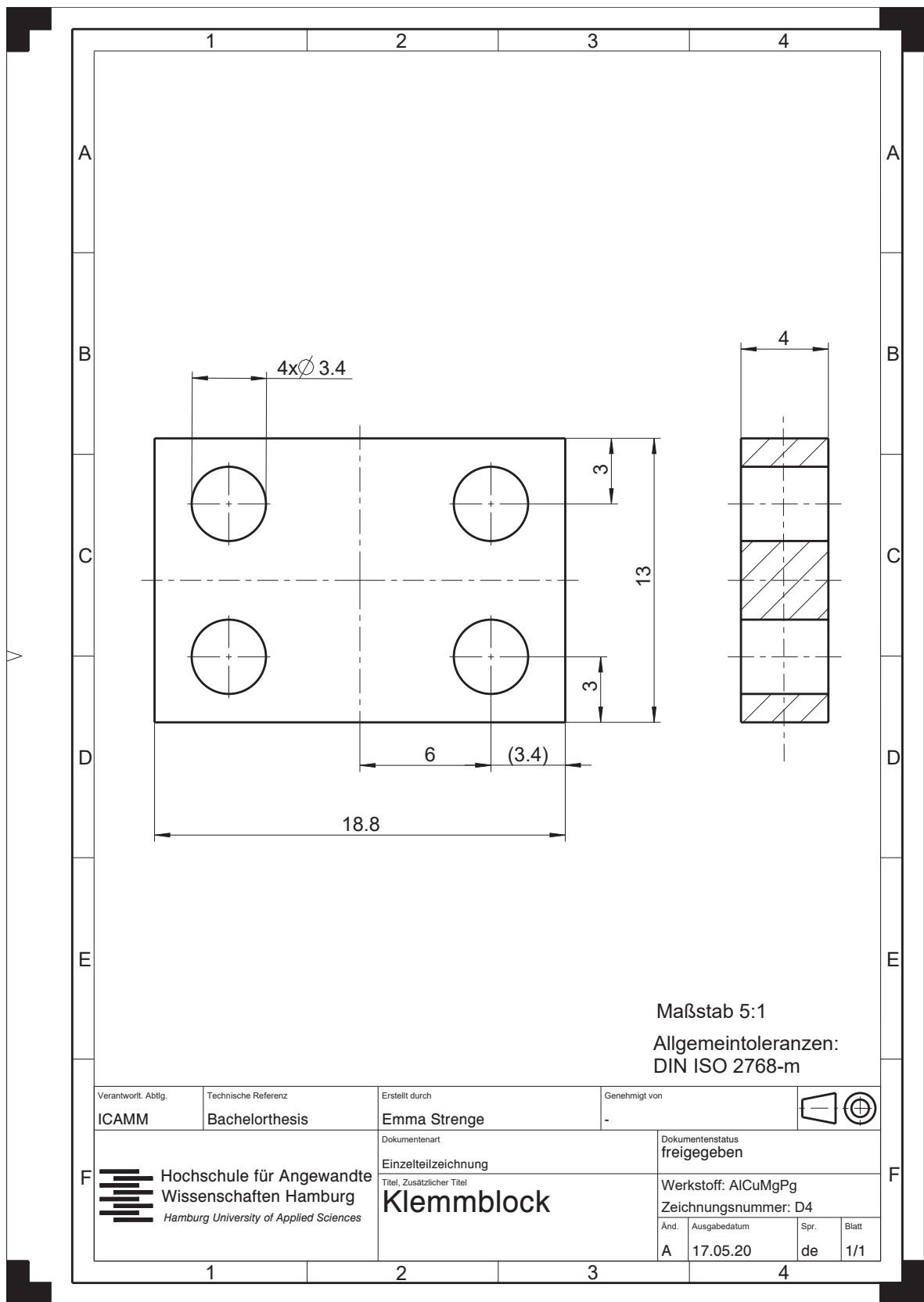


ABBILDUNG B.13: Zeichnung D4 Klemmblock

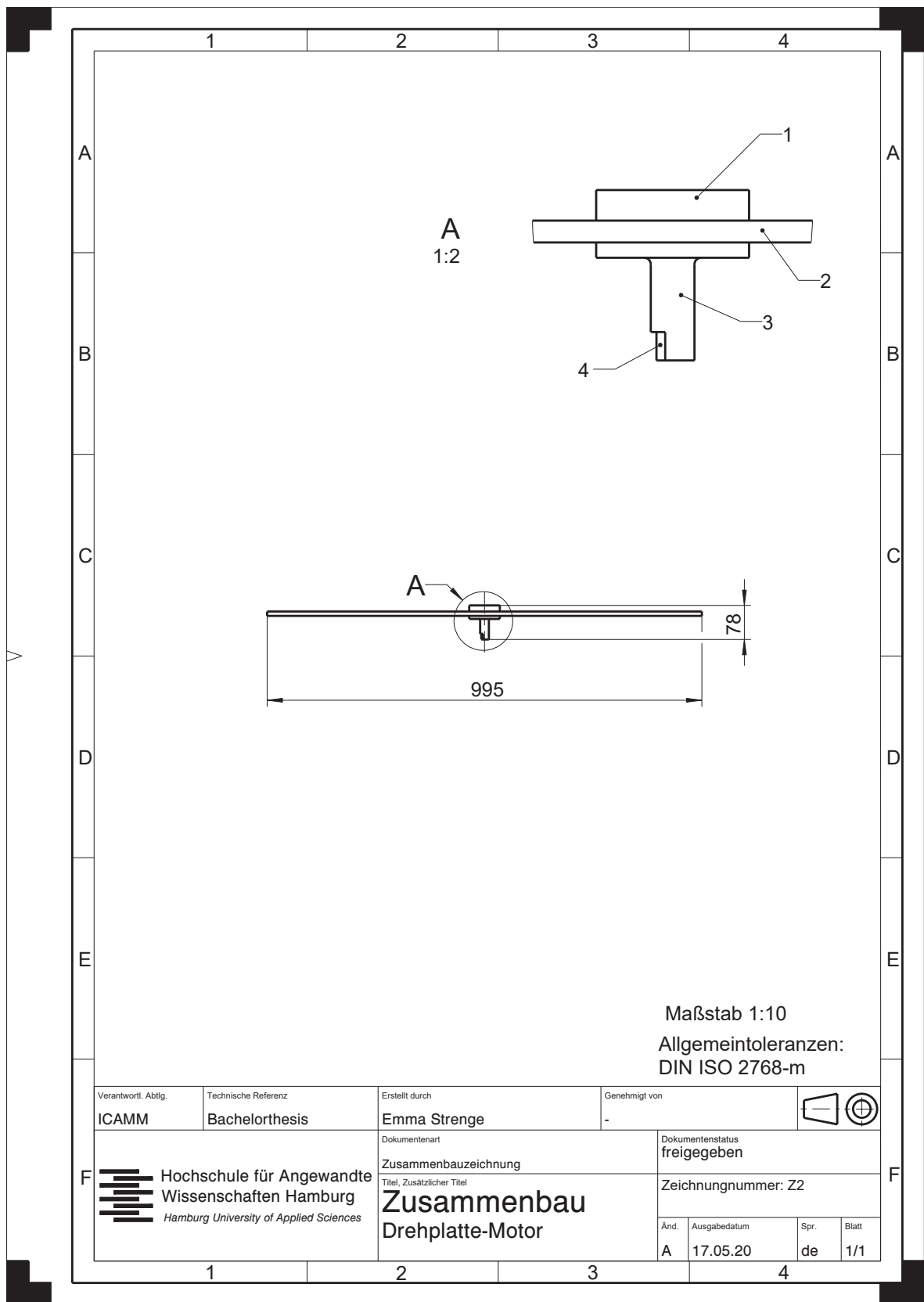


ABBILDUNG B.14: Zeichnung D2 Zusammenbau Drehplatte- Motor

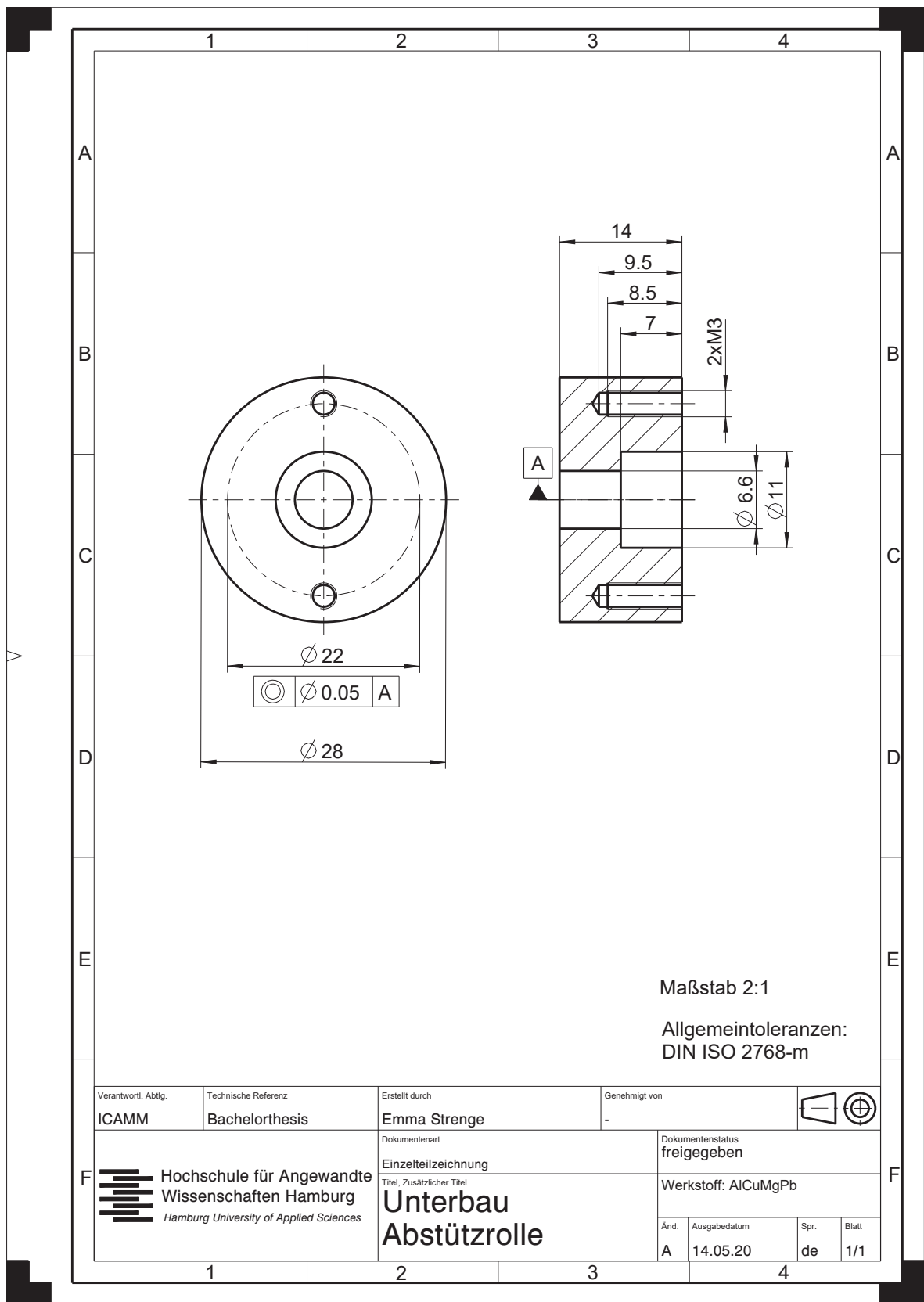


ABBILDUNG B.15: Zeichnung Unterbau Abstützrolle

B.4 Zusammenbau des Robotersystems

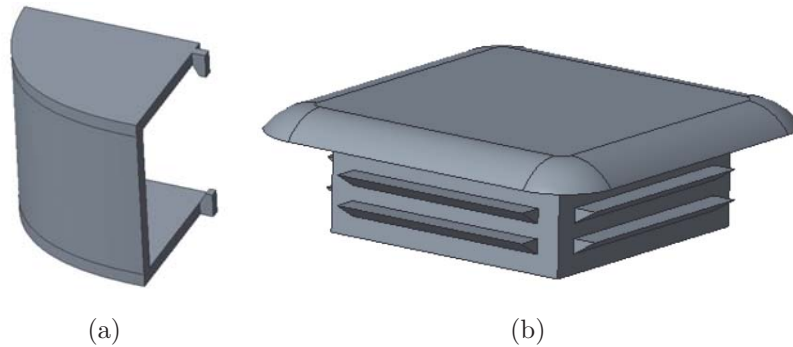
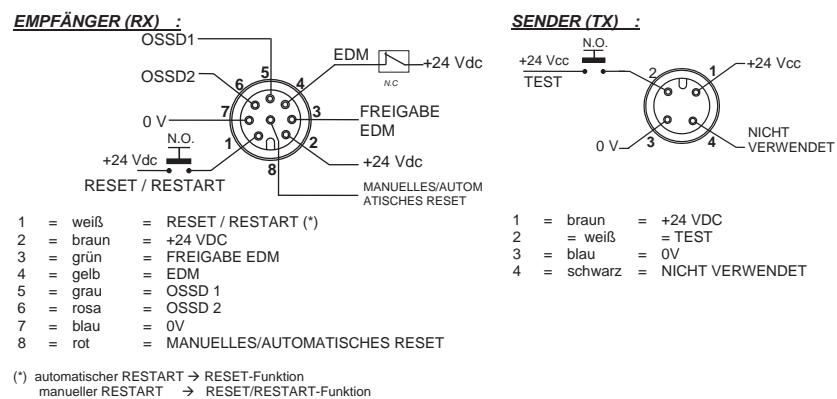


ABBILDUNG B.16: 3D- gedruckte Abdeckungen. (a) für die Montagewinkel der Lichtschranken. (b) für die offenen Profilen am Montagerahmen.



Funktion	Anschluss an	Status
TEST	+ 24 Vdc	TEST ON
	Nicht angeschlossen oder 0V	TEST OFF
RESET	+ 24 Vdc	RESET ON
	Nicht angeschlossen oder 0V	RESET OFF
EDM	Kontakt Normal geschlossener Zustand eines zwangeführten Relais	FREIGABE EDM ON
	Nicht angeschlossen oder 0V	FREIGABE EDM OFF
FREIGABE EDM	+ 24 Vdc	EDM OFF
	Nicht angeschlossen oder 0V	EDM ON
MAN/AUTO RESET	OSSD1	AUTOMATISCHES RESET
	OSSD2	MANUELLES RESET

ABBILDUNG B.17: Elektrische Anschlüsse Sicherheitslichtschranke PSEN op4H-s-30-180/1 [20].

Stromlaufpläne

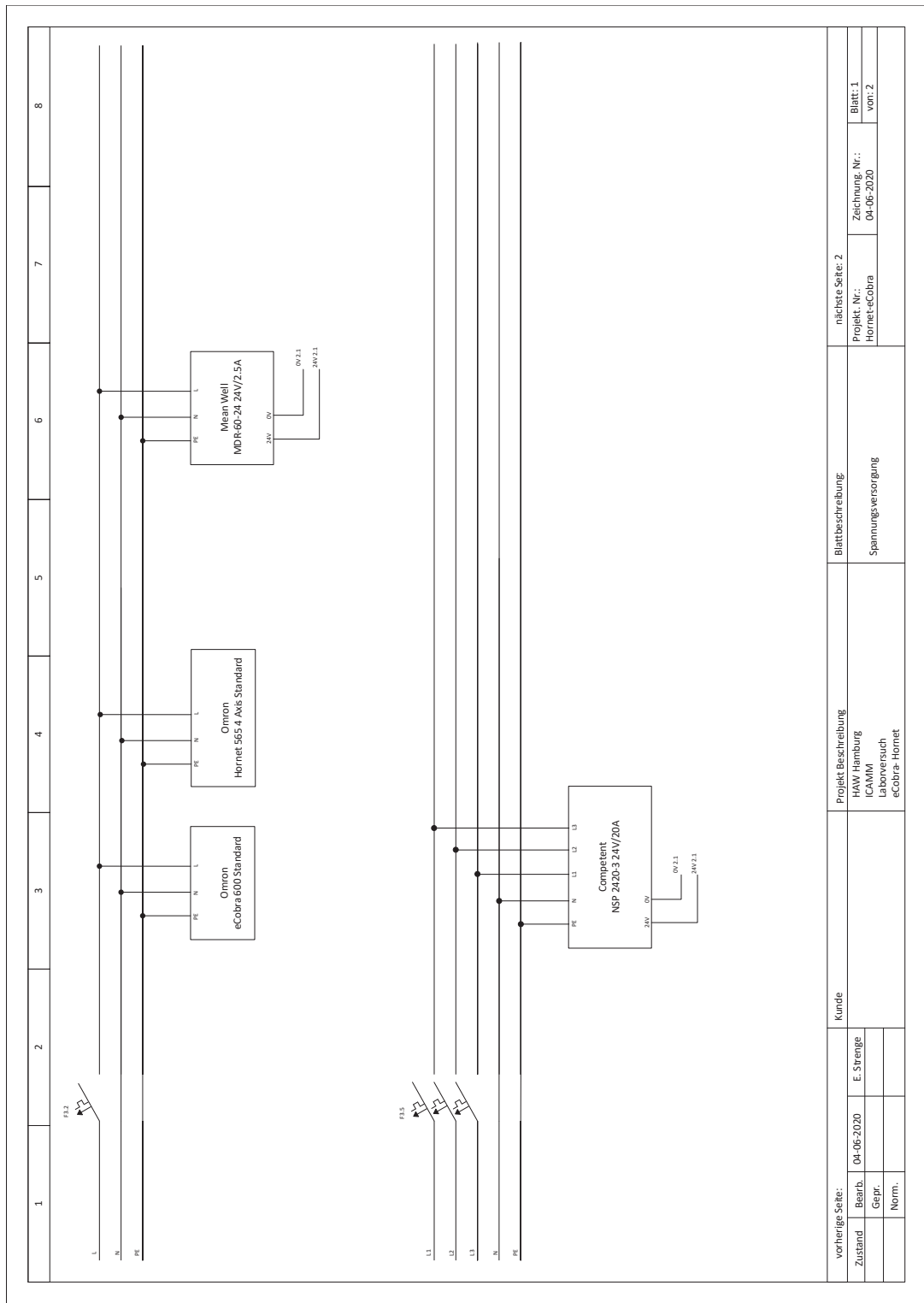


ABBILDUNG B.18: Schaltplan Seite 1

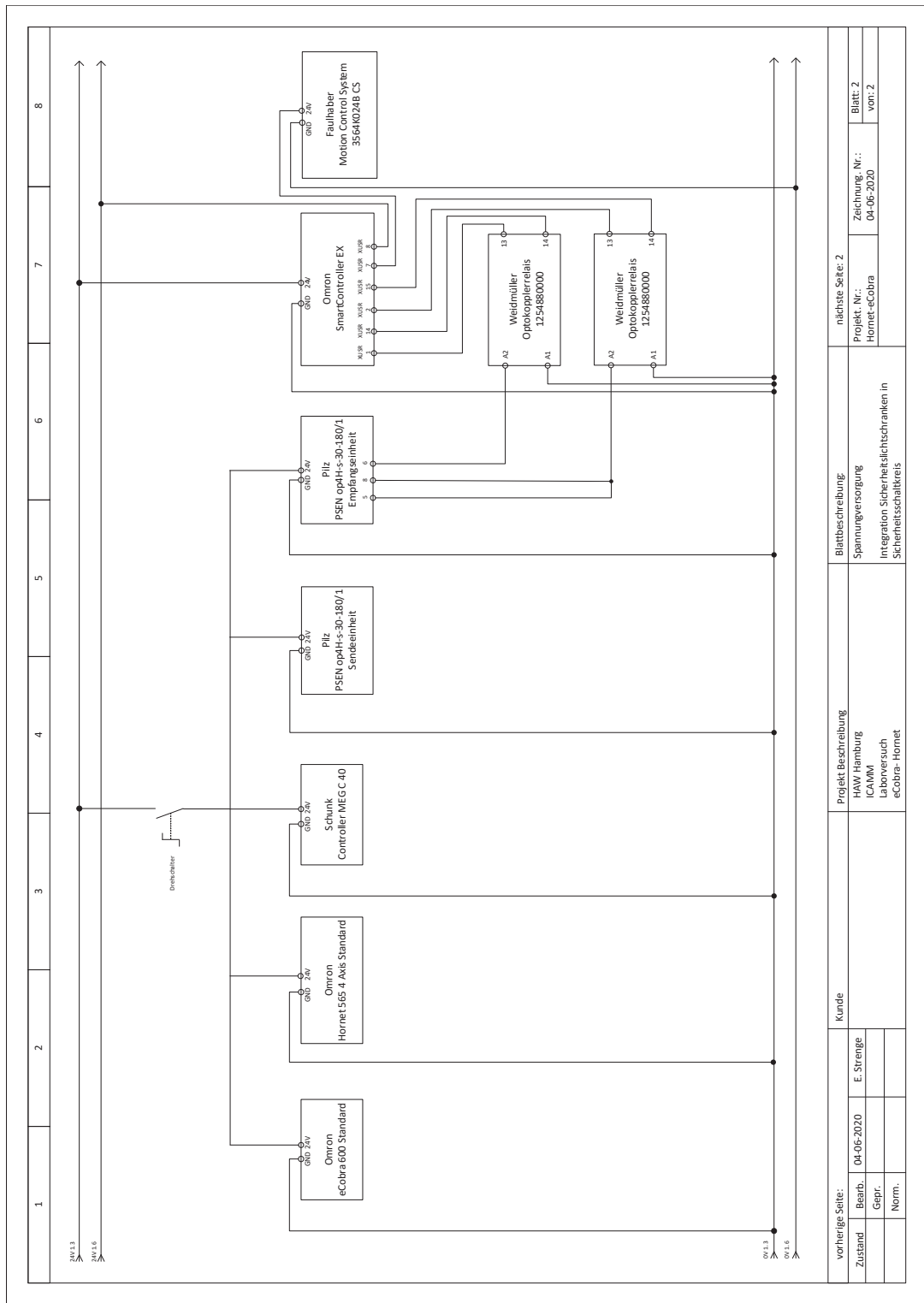


ABBILDUNG B.19: Schaltplan Seite 2

Funktion	Terminalbezeichnung	Signalbank	V+ Signalnummer
	Input 1	1	1065
	Input 2	1	1066
	Input 3	1	1067
	Input 4	1	1068
	Input 5	1	1069
	Input 6	1	1070
	Input 1	2	1071
	Input 2	2	1072
	Input 3	2	1073
	Input 4	2	1074
	Input 5	2	1075
	Input 6	2	1076
Vakuum erzeugen	Output 1		0137
Magnetventil öffnen	Output 2		0138
	Output 3		0139
	Output 4		0140
	Output 5		0141
	Output 6		0142

TABELLE B.3: XIO Termination Block Belegung der digitalen Ein- und Ausgänge (in Anlehnung an [39])

Funktion	Terminalbezeichnung	V+ Signalnummer
	Input 1	1113
	Input 2	1114
	Input 3	1115
	Input 4	1116
	Input 5	1117
Greifer steht	Input 6	1118
	Input 7	1119
	Input 8	1120
Greifer zu	Output 1	0105
Greifer auf	Output 2	0106
	Output 3	0107
	Output 4	0108
	Output 5	0109
	Output 6	0110
	Output 7	0111
	Output 8	0112

TABELLE B.4: IO Blox Belegung der digitalen Ein- und Ausgänge am IO Blox #1 (in Anlehnung an [40])

C Anhang zu Kapitel 5

Berechnung der kin. Energie eines herausgeschleuderten Greifobjektes

Für das Berechnen der maximal auftretenden kinetischen Energie, infolge des Herausschleuderns eines Greifobjektes nach Gleichung 5.2 sind folgende Werte zu berücksichtigen:

Masse:	$m = 0,0382 \text{ kg}$, höchste Greifobjektmasse (vgl. Tabelle 4.1)
max. Geschwindigkeit:	$v_{max} = 5,7 \text{ m s}^{-1}$, Höchstgeschwindigkeit des Hornet [5]

$$\begin{aligned}
 E_{kin} &= \frac{1}{2} \cdot 0,0382 \text{ kg} \cdot (5,7 \text{ m s}^{-1})^2 \\
 &= 0,62 \text{ J}
 \end{aligned}$$

Die kinetische Energie beträgt 0,62 J.

Berechnung des Mindestsicherheitsabstands

Entsprechend der Gleichung 5.4 wird der Mindestsicherheitsabstand berechnet. Zum Berechnen der Nachlaufzeit T_N nach Gleichung 5.3 wird neben der Ansprechzeit der Sicherheitslichtschranke die Anhaltezeiten t_2 der Roboter benötigt. Die Anhaltezeit ist Abbildung C.1 für den jeweiligen Roboter zu entnehmen. Maßgebend ist das Gelenk oder die Richtung, welche am meisten Zeit bis zum endgültigen Stop benötigt. Für den eCobra ist das der Joint 2 mit 0.28 s. Der Hornet mit der J4- Plattform benötigt in alle Richtungen eine maximale Anhaltezeit von 0,09 s.

Ansprechzeit:	$t_1 = 0,028 \text{ s}$, [20]
Auflösung	$d = 30 \text{ mm}$, [20]
Annäherungsgeschwindigkeit:	$K = 400 \text{ mm s}^{-1}$	

Mindestabstand für den eCobra:

$$\begin{aligned}T_N &= 0,028 \text{ s} + 0,28 \text{ s} \\ &= 0,308 \text{ s}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}S_{min} &= (400 \text{ mm s}^{-1} \cdot 0,308 \text{ s}) + 8 \cdot (30 \text{ mm} - 14 \text{ mm}) \\ &= 251,2 \text{ mm}\end{aligned}$$

Der Bewegungsraum des eCobras braucht einen Abstand von **251,2 mm** zu den Sicherheitslichtschranken.

Mindestabstand für den Hornet:

$$\begin{aligned}T_N &= 0,028 \text{ s} + 0,09 \text{ s} \\ &= 0,118 \text{ s}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}S_{min} &= (400 \text{ mm s}^{-1} \cdot 0,118 \text{ s}) + 8 \cdot (30 \text{ mm} - 14 \text{ mm}) \\ &= 175,2 \text{ mm}\end{aligned}$$

Der Hornet hat einen Mindestsicherheitsabstand von **175,2 mm**.

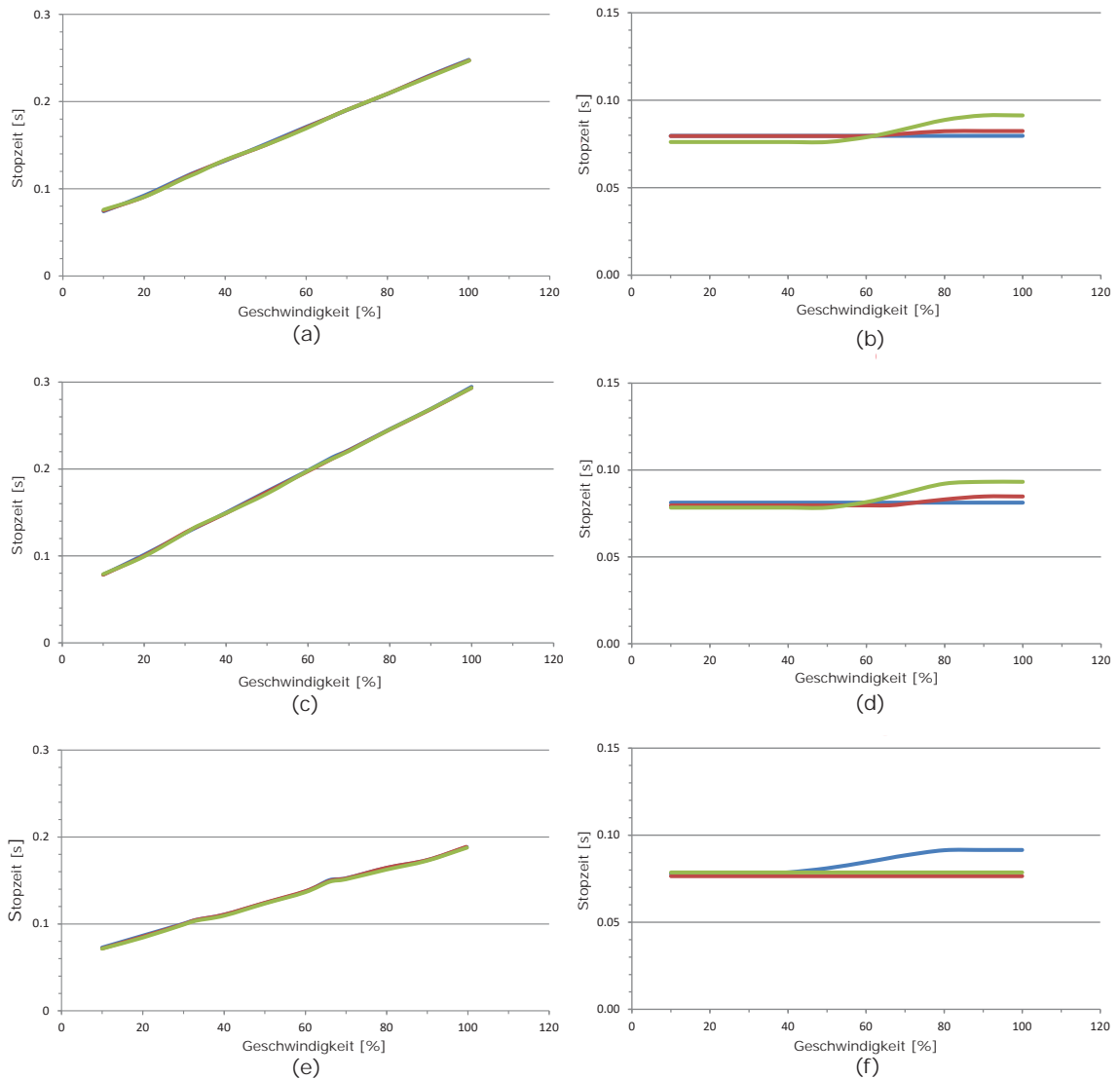


ABBILDUNG C.1: Diagramme zu den Stopzeiten des eCobra 600 und des Hornet 565 mit J4- Plattform. (a) Joint 1 eCobra. (b) X- Richtung Hornet. (c) Joint 2 eCobra. (d) Y- Richtung Hornet. (e) Joint 3 eCobra. (f) Z-Richtung Hornet. Grün 100 % Nutzlast. Rot 66 % Nutzlast. Blau 33 % Nutzlast. (in Anlehnung an [4] [6])

D Anhang zu Kapitel 6

Name	Type	Initial Value	Robot
homeecobra	Location	600,000 0,000 200,000 0,000 180,000 0,000	R1Cobra600
punkt13	Location	63,458 -404,152 183,518 0,000 180,000 0,000	R1Cobra600
punkt14	Location	18,282 -404,074 183,482 0,000 180,000 0,000	R1Cobra600
punkt15	Location	-26,994 -404,074 183,481 0,000 180,000 0,000	R1Cobra600
punkt16neu	Location	63,458 -352,623 183,481 0,000 180,000 0,000	R1Cobra600
punkt17neu	Location	18,282 -352,592 183,481 0,000 180,000 0,000	R1Cobra600
punkt18	Location	-26,994 -352,592 183,482 0,000 180,000 0,000	R1Cobra600
punkt19	Location	58,014 473,315 183,481 0,000 180,000 0,000	R1Cobra600
punkt20	Location	12,974 473,315 183,481 0,000 180,000 0,000	R1Cobra600
punkt21	Location	-32,066 473,315 183,482 0,000 180,000 0,000	R1Cobra600
punkt22	Location	58,014 524,875 183,481 0,000 180,000 0,000	R1Cobra600
punkt23	Location	12,974 524,875 183,481 0,000 180,000 0,000	R1Cobra600
punkt24	Location	-32,066 524,875 183,482 0,000 180,000 0,000	R1Cobra600

ABBILDUNG D.1: Übersicht der Position der eingeteachten Punkte des eCobra.

Name	Type	Initial Value	Robot
homehornet	Location	0,000 0,000 -900,000 0,000 180,000 0,000	R2Hornet565
punkt10neu	Location	261,039 493,786 -994,840 0,000 180,000 0,000	R2Hornet565
punkt11neu1	Location	216,326 493,192 -994,840 0,000 180,000 0,000	R2Hornet565
punkt12neu1	Location	171,584 494,170 -994,840 0,000 180,000 0,000	R2Hornet565
punkt1hornet	Location	256,575 -442,500 -994,840 0,000 180,000 0,000	R2Hornet565
punkt2hornet	Location	213,072 -442,500 -994,840 0,000 180,000 0,000	R2Hornet565
punkt3hornet	Location	169,169 -442,500 -994,840 0,000 180,000 0,000	R2Hornet565
punkt4hornet	Location	256,575 -390,454 -994,840 0,000 180,000 0,000	R2Hornet565
punkt5hornet	Location	213,072 -390,454 -994,840 0,000 180,000 0,000	R2Hornet565
punkt6hornet	Location	169,169 -390,554 -994,840 0,000 180,000 0,000	R2Hornet565
punkt7neuhornet	Location	261,039 442,648 -994,840 0,000 180,000 0,000	R2Hornet565
punkt8neuhornet	Location	216,336 442,648 -994,840 0,000 180,000 0,000	R2Hornet565
punkt9neuhornet	Location	171,809 442,648 -994,840 0,000 180,000 0,000	R2Hornet565

ABBILDUNG D.2: Übersicht der Position der eingeteachten Punkte des Hornet.

```
1  ▢ .PROGRAM gripperopen()
2  ;
3      ; In Emulationsmodus auskommentiert lassen
4      TYPE "Greifer oeffnen"
5      SIGNAL 106
6      SIGNAL -105
7      WAIT SIG(-1118)
8      WAIT SIG(1118)
9      BREAK
10
11  ▢ .END
12
```

ABBILDUNG D.3: Programmcode gripperopen().

```
1  ▢ .PROGRAM gripperclose()
2  ;
3      ; In Emulationsmodus auskommentiert lassen
4
5      TYPE "Greifer schliessen"
6      SIGNAL 105
7      SIGNAL -106
8      WAIT SIG(-1118)
9      WAIT SIG(1118)
10     BREAK
11
12
13  ▢ .END
14
```

ABBILDUNG D.4: Programmcode gripperclose().

```
1 .PROGRAM gripperprecond()
2 ; ABSTRACT: Zur Absicherung der richtigen (geöffneten) Greiferstellung bei Programmstart.
3
4 IF SIG(106) AND SIG(105) THEN
5
6     SIGNAL -106
7     WAIT.EVENT , 0.1
8     SIGNAL 106
9     WAIT.EVENT , 1.5
10    SIGNAL -105
11    WAIT.EVENT , 0.1
12
13 ELSE
14
15     IF SIG(-106) AND SIG(105) THEN
16         CALL gripperopen()
17     ELSE
18     IF SIG(-106) AND SIG(-105) THEN
19         CALL gripperopen()
20
21     ELSE
22     IF SIG(106) AND SIG(105) THEN
23         CALL gripperopen()
24     ELSE
25     IF SIG(106) AND SIG(-105) THEN
26         SIGNAL -106
27         WAIT.EVENT , 0.1
28         SIGNAL 106
29         WAIT.EVENT , 1.5
30     END
31     END
32     END
33
34     END
35
36     END
37
38 .END
39
```

ABBILDUNG D.5: Programmcode gripperprecond().


```

1 .PROGRAM ecobrav()
2     SELECT ROBOT = 1
3     ATTACH (0,1)
4
5     SET greiferec =TRANS(0,0,0,0,0,0)
6     TOOL greiferec
7
8     CALL gripperprecond()
9
10
11     SET pick1[1]= punkt19;
12     SET pick1[2]= punkt20;
13     SET pick1[3]= punkt21;
14     SET pick1[4]= punkt22;
15     SET pick1[5]= punkt23;
16     SET pick1[6]= punkt24;
17
18     SET pick2[1]= punkt13;
19     SET pick2[2]= punkt14;
20     SET pick2[3]= punkt15;
21     SET pick2[4]= punkt16neu;
22     SET pick2[5]= punkt17neu;
23     SET pick2[6]= punkt18;
24
25 ; _____ Anfang
26 ; Startposition
27     MOVE homeecobra ; Grundstellung
28     BREAK
29 ; Zeitnahme
30     TIMER (1) = 0 ;$curr_time1 = $TIME()
31
32 ; _____ Hauptteil
33 ;6Teile hin
34     FOR i = 1 TO 6
35         TYPE "eCobra Hintour: Processing part ", /IO, i, " !!"
36         RIGHTY
37         APPRO pick1[i], 50
38         MOVES pick1[i]
39         BREAK
40         CALL gripperclose()
41         BREAK
42         DEPART 50
43         BREAK
44
45         LEFTY
46         APPRO pick2[i], 50
47         MOVES pick2[i]
48         BREAK
49         CALL gripperopen()
50         BREAK
51         DEPART 50
52         BREAK
53     END
54
55 ;6Teile zurück
56     FOR j = 1 TO 6
57         TYPE "eCobra Rücktour: Processing part ", /IO, j, " !!"
58         LEFTY
59         APPRO pick2[j], 50
60         MOVES pick2[j]
61         BREAK
62         CALL gripperclose()
63         BREAK
64         DEPART 50
65         BREAK
66
67         RIGHTY
68         APPRO pick1[j], 50
69         MOVES pick1[j]
70         BREAK
71         CALL gripperopen()
72         BREAK
73         ;Wieder ein stück hochfahren damit klots nicht weggehauen wird
74         DEPART 50
75         BREAK
76     END
77 ; _____ Ende
78 ; Endposition
79     MOVE homeecobra ; Grundstellung
80     BREAK
81 ; Zeitnahme
82
83     TYPE "Processing Time: ", /F8.4, TIMER(1), " !"
84 .END
85

```

ABBILDUNG D.6: Programmcode ecobrav().

```

1 PROGRAM hornetvs()
2   SELECT ROBOT = 2
3   ATTACH (0, 2)
4
5
6   SET pick1[1] = punkt7neuhornet ;
7   SET pick1[2] = punkt8neuhornet ;
8   SET pick1[3] = punkt9neuhornet ;
9   SET pick1[4] = punkt10neu ;
10  SET pick1[5] = punkt11neu ;
11  SET pick1[6] = punkt12neu ;
12
13  SET pick2[1] = punkt1hornet ;
14  SET pick2[2] = punkt2hornet ;
15  SET pick2[3] = punkt3hornet ;
16  SET pick2[4] = punkt4hornet ;
17  SET pick2[5] = punkt5hornet ;
18  SET pick2[6] = punkt6hornet ;
19
20 ; Anfang
21 ; Startposition
22   SIGNAL (137)
23   MOVE homehornet ; Grundstellung
24   BREAK
25 ; Zeitnahme
26   DELAY 10
27   TIMER (1) = 0 ;$curr_time1 = $TIME()
28
29 ; Hauptteil
30 ;6Teile hin
31   FOR i = 1 TO 6
32     TYPE "Hornet Hintour: Processing part ", /IO, i, " !!!!!"
33     APPRO pick1[i], 50
34     MOVES pick1[i]
35     BREAK
36     SIGNAL (138)
37     DELAY 0.016
38     BREAK
39     DEPART 50
40     BREAK
41
42     APPRO pick2[i], 50
43     MOVES pick2[i]
44     BREAK
45     SIGNAL (-138)
46     DELAY 0.045
47     BREAK
48     ;Wieder ein stück hochfahren damit klotz nicht weggehauen wird
49     DEPART 50
50   END
51
52 ;6Teile zurück
53   FOR j = 1 TO 6
54     TYPE "Hornet Rücktour: Processing part ", /IO, j, " !!!!!"
55     APPRO pick2[j], 50
56     MOVES pick2[j]
57     BREAK
58     SIGNAL (138)
59     DELAY 0.016
60     BREAK
61     DEPART 50
62     BREAK
63
64     APPRO pick1[j], 50
65     MOVES pick1[j]
66     BREAK
67     SIGNAL (-138)
68     DELAY 0.045
69     BREAK
70     ;Wieder ein stück hochfahren damit klotz nicht weggehauen wird
71     DEPART 50
72   END
73 ; Ende
74 ; Endposition
75   MOVE homehornet ; Grundstellung
76   BREAK
77 ; Zeitnahme
78
79   TYPE "Processing Time: ", /F8.4, TIMER(1), " !"
80   SIGNAL (-137)
81
82 .END
83

```

ABBILDUNG D.7: Programmcode hornetvs().

```
1 COMPATIBLE0
2 CONTMOD
3 SORO
4 ADR
5 MVO
6 MAV100
7 STW1
8 STN1000
9 LL1800000000
10 LL-1800000000
11 APLO
12 SIN1
13 SETTTL
14 ENCOUT
15 DCE200
16 LPN255
17 CO
18 HB0
19 HP2
20 HD0
21 SHAO
22 SHNO
23 SHLO
24 POHOSEQO
25 HOSP100
26 ENCRE2048
27 MOTTYP8
28 KN475
29 RM1300
30 SP9237
31 AC300
32 DEC90
33 SR4
34 POR48
35 I1
36 PP7
37 PD4
38 CI12
39 LPC8000
40 LCC3040
41 DEV30000
42 CORRIDOR20
43 DI
44 VO
45 DIPROG
46 ANSWO
47 NET1
48 NODEADR1
```

ABBILDUNG D.8: Parameterdatei des Motion Control Systems.

```
1  .PROGRAM serialmotor()  
2  
3      AUTO slun  
4      AUTO $text  
5  
6      ATTACH(slun,4) "SERIAL:0"  
7      IF IOSTAT(slun) < 0 GOTO 100  
8  
9      FSET(slun) "/PARITY NONE /STOP_BITS 1 /BYTE_LENGTH 8 /FLOW NONE /SPEED 9600"  
10     IF IOSTAT(slun) < 0 GOTO 100  
11  
12     WRITE(slun) "1EN"  
13     IF IOSTAT(slun) < 0 GOTO 100  
14  
15  
16     WRITE(slun) "1V300"  
17     IF IOSTAT(slun) < 0 GOTO 100  
18  
19  100 IF (IOSTAT(slun) <0) THEN  
20         TYPE IOSTAT(slun), "", $ERROR(IOSTAT(slun))  
21     END  
22  
23     DETACH(slun)  
24  
25  
26     .END  
27
```

ABBILDUNG D.9: Programmcode serialmotor().



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Streng

Vorname: Emma

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme einer Roboterzelle für den kooperativen Einsatz einer Parallelkinematik mit einem Scara

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

07.06.2020

Datum

Unterschrift im Original