



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

Sören Ahrens

Automatisierung einer Prepreg-Produktion am Beispiel des ATLAS-Teilchendetektors

*Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Automotive and
Aeronautical Engineering*

Sören Ahrens

**Automatisierung einer Prepreg-Produktion
am Beispiel des ATLAS-Teilchendetektors**

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang Master of Science Flugzeugbau
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY
FH-Bereich, Gruppe: ATLAS

■■■■■■■■■■
■■■■■■■■■■

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Michael Seibel
Zweitprüfer: Dr. Sergio Diéz Cornell

Abgabedatum: 27. November 2023

Zusammenfassung

Sören Ahrens

Thema der Masterthesis

Automatisierung einer Prepreg-Produktion
am Beispiel des ATLAS-Teilchendetektors

Stichworte

Automatisierung, vorimprägnierte Fasern, Matrix, Sandwichstruktur, Automatischer Tapeleger- ATL, Speicherprogrammierbare Steuerung - SPS, Roboter

Kurzzusammenfassung

In dieser Arbeit wird eine manuelle Faserverbund-Fertigung von einfachen Platten in eine automatisierte Produktion transferiert. Hierzu werden die Grundlagen der Anwendung, der Fertigungsmethoden sowie die Realisierung eines solchen Prozesses erläutert. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit besteht in der Erforschung von möglichen Ablagemechanismen von Faserverbund-Halbzeugen sowie die methodische Entwicklung, Konstruktion und Umsetzung einer automatisierten Maschine.

Sören Ahrens

Title of the paper

Automation of a prepreg production
using the example of the ATLAS particle detector

Keywords

Automation, pre-preg, matrix, sandwich structure, automated tape layer - ATL, programmable logic controller - PLC, Robot

Abstract

In this paper, a manual fibre composite production of simple panels is transferred to an automated production. For this purpose, the basics of the application, the manufacturing methods as well as the realisation of such a process are explained. The main focus of this work is the research of possible depositing mechanisms of fibre composite semi-finished products, as well as the methodical development, construction and implementation of an automated machine.

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Masterthesis entstand im Rahmen meines berufsbegleitenden Masterstudiums an der HAW Hamburg und in Zusammenarbeit mit meinem Arbeitgeber, dem DESY in Hamburg. An dieser Stelle möchte ich mich recht herzlich bei meiner Vorgesetzten, Frau Prof. Dr. Ingrid Maria Gregor, und meinem Betreuer und Zweitprüfer, Herrn Dr. Sergio Díez Cornell, bedanken, die mir gemeinsam einen großen Vertrauensvorschuss gegeben haben, um dieses Projekt realisieren zu können. Des Weiteren möchte ich mich recht herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Seibel bedanken, der als Erstprüfer dieses Projekt interessiert begleitet hat.

Ohne die eingebrachten Ideen und die bereitwillige Hilfe meiner Kolleginnen und Kollegen wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen. So möchte ich Herrn Torsten Külper hervorheben, der mit seinem technischen Wissen die Steuerung sowie Verdrahtung der Maschine realisiert hat und immer zielstrebig auf das Ergebnis geguckt hat. Des Weiteren möchte ich mich bei Dipl.-Ing. Volker Prahl, Dipl.-Ing. Daria Ariza, Oliver Skura und Christian Camien für deren Ideenreichtum bedanken. Ein weiterer Dank geht an Florian Andresen für die Vermessung sowie an Norbert Wien und Ralf Kühn für deren Einsatz bei der Blechbearbeitung.

Auch bei meinen fleißigen Kollegen, die diese Arbeit gelesen und korrigiert haben, möchte ich mich recht herzlich bedanken: M.Sc. Maximilian Felix Casper, Dr. Lennart Huth, Dipl.-Ing. Dario Ariza, M.Sc. Oskar Reichelt, Dr. Jan-Hendrik Arling und vor allem Dr. Marcel Stanitzki.

Mein größter Dank geht an meine liebe Frau Nicole, die mir immer den Rücken frei gehalten hat und mich immer bei meinem Studium sowie dieser Abschlussarbeit unterstützt hat. Auch bei meinen beiden Töchtern Jonna und Ida, die oft auf ihren Papa verzichten mussten, möchte ich mich ganz herzlich bedanken.

“Alles, was an Großem in der Welt geschah,
vollzog sich zuerst in der Phantasie eines Menschen.”
(Astrid Lindgren 1958)

für Jonna und Ida

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	xi
Abkürzungsverzeichnis	xii
Formelzeichenverzeichnis	xiv
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufgabenstellung	1
1.3 Aufbau der Arbeit	2
2 Forschung in der Teilchenphysik	3
2.1 DESY	3
2.2 Teilchenbeschleuniger	4
2.3 Teilchenphysik am DESY – von HERA zur LHC-Beteiligung	4
2.4 Detektortechnik	6
2.5 ATLAS-Detektor	7
2.5.1 Ereignis im ATLAS-Detektor	7
2.5.2 Materialeigenschaften im Detektor	9
2.5.3 Aufbau des Petals	12
3 Stand der Technik	15
3.1 Prepreg-Autoklav-Verfahren	15
3.2 Grundlagen Prepreg-Leger	18
3.2.1 Funktionsweise vollautomatisierter CFK-Tapeleger	18
3.3 Funktion einer Sandwichstruktur	19
3.3.1 Betrachtung des Petals als Sandwichstruktur	22

3.4	Grundlagen Faser-Kunststoff-Verbund	24
3.4.1	Faserarten	26
3.4.2	Harzsysteme	28
4	Konzeptionierung eines Prepreg-Legers	30
4.1	Anforderungen	30
4.2	Versuche zum werkzeuggestützten Ablegen von Prepreg	32
4.3	Entwicklung eines Werkzeugkopfes zur Aufnahme und Ablage von Prepreg	34
4.4	Auswahl geeigneter Bewegungsapparate	35
4.4.1	Morphologischer Kasten	36
4.4.2	Skizzen der Lösungsvarianten	39
4.4.3	Kriterien	42
4.4.4	Lösungsbewertung mit dem Wertigkeitsverfahren	43
4.4.5	Beschreibung der favorisierten Lösung	43
5	Konstruktive Ausführung der favorisierten Lösung	45
5.1	Baugruppenunterteilung	45
5.2	Skizze	46
5.3	Umsetzung des Bewegungsapparates	46
5.4	Erster Entwurf Werkzeugkopf	47
5.4.1	Schneidvorrichtung	47
5.4.2	Transporteinheit	48
5.5	Roboterportal	50
5.5.1	Auswahl der Portalkomponenten	50
5.5.2	Auswahl der Steuerungs- und Antriebseinheit	53
5.5.3	Konstruktion des Portals	55
5.5.4	Komponenten des Portals	56
5.6	Finales Design Werkzeugkopf	57
5.6.1	Dreh- und Schwenkeinheit	58
5.6.2	Transporteinheit	62
5.7	Gestell	63
5.8	Personensicherheit	64
5.9	Steuerung und Antrieb	64
5.10	Gesamtkonstruktion	67

6 Realisierung der Konstruktion	68
6.1 Von der Zeichnung zur Fertigung	68
6.1.1 Bedeutung der Zeichnungserstellung zur Erfüllung der Maschinen- genauigkeit	68
6.2 Fertigungsverfahren	75
6.3 Montage und Ausrichtung des Gestells	77
6.4 Inbetriebnahme/ Programmierung	81
7 Zusammenfassung und Ausblick	84
Literaturverzeichnis	86
A Anhang	93
Selbstständigkeitserklärung	133

Abbildungsverzeichnis

2.1	DESY Campus Hamburg 2020	3
2.2	Darstellung des LHC-Teilchenbeschleuniger am CERN [3]	5
2.3	Schematischer Aufbau eines Detektors in der Hochenergiephysik [4]	6
2.5	Prototyp des R3 Stripsensors	7
2.4	ATLAS-Detektor im Überblick	8
2.6	Dieses Kollisionsereignis zeigt deutlich drei Spuren: ein W-Boson, ein Z-Boson und ein Photon [20].	9
2.7	Petal Aufbau	12
2.8	Petal Aufbau	13
3.1	Schema Autoklav, Einzelnachweis Lagenaufbau A.6	16
3.2	Handgelege vom Petal	17
3.3	ATL-Funktionsprinzip (links) und ATL-Ablegekopf von M.Torres Diseños Industriales (rechts) [31]	19
3.4	Aufbau von Sandwichstrukturen [28]	20
3.5	Zusammenhang zwischen Kräften und Spannungen im Sandwich [30] M - Moment, N - Normalkraft, T oder Q - Querkraft, τ - Schubspannung, σ - Zugspannung, E - Elastizitätsmodul, ν - Querkontraktionszahl/ Poissonzahl, t - Materialdicke	20
3.6	Entwicklung vom Vollquerschnitt zum Sandwichaufbau [28]	21
3.7	Relativer Einfluss der Sandwichkerndicke auf die Steifigkeit und das Gewicht des Verbundes [28]	22
3.8	Eigenschaften von Polyacrylnitril (PAN)- und Mesophasen-Pech (Pitch)-basierten Kohlenstoffasern, übersetzt aus Grafik: [23]	27
4.1	Prepreg-Vorschnitt	32
4.2	Vorgeschnittenes Prepreg	33
4.3	Versuch: Aufwickeln vom Trägerpapier	33
4.4	Übersicht des ersten Prototypen	34

4.5	HandgefuehrtesWerkzeug	35
4.6	Handskizze der Lösungsvariante 1: Gelenkroboter	39
4.7	Handskizze der Lösungsvariante 2: Portalroboter	40
4.8	Handskizze der Lösungsvariante 3: Deltaroboter	41
5.3	Schneidvorrichtung schematisch	48
5.4	Erster Entwurf Werkzeugkopf	49
5.5	R+K Flanschverbindung [26]	50
5.6	Auslegung Lineareinheit: X-Achse	52
5.8	Gefertigte Verbindungen zur Aufnahme der Linearachsen und R+K-Profile	56
5.10	Werkzeugkopf komplett	58
5.14	Kabelführung	61
5.17	Schaltschrank	65
6.1	Diagramm einer Temperaturkurve zum Tempern von Kunststoffen [27] . .	76
6.2	3D-Druck Bauteile	77
6.3	Messprotokoll Portal	80
6.4	Drehdynamik Aufwickelmotor	82
6.5	Fahrdynamik Y-Achse	83
A.1	Aufgabenbeschreibung Masterthesis	94
A.2	Auslegung Lineareinheit: X-Achse	95
A.3	Auslegung Motorsteuerung	118
A.4	Auswahl Getriebe	119
A.5	Glasfaserklinge	120
A.6	Toray Datenblatt EX-1515	127
A.7	Hysol Datenblatt EA 9396	131

Tabellenverzeichnis

2.1	Wichtigste Materialanforderungen des Petal [41]	11
3.1	Vergleichswerte verschiedener Werkstoffe im Bezug zu CFK [8]	25
3.2	Materialeigenschaften Faser K13C2U von Mitsubishi CCFC [22]	28
4.1	Anforderungsliste	31
4.2	Lösungsmatrix (Einzelnachweise:[2])	36
4.3	Wertigkeitsverfahren	44
6.1	Portalausrichtung: Werte sind Angaben über die gesamte Länge der Li- nearachsen	78

Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Bedeutung
AFP	Automated fiber placement
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
ATL	Automated tape laying
ATLAS	A Toroidal LHC ApparatuS, Detektor am LHC-Beschleuniger
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, Forschungsinstitut in Genf
CAD	Computer aided design, computegestütztes Modellieren
CAM	Computer Aided Manufacturing
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff/ kohlenstoffaserverstärkter Kunststoff
CF-EP	Kohlenstofffaser-Epoxid-Verbund
CMS	Compact Muon Solenoid
CNC	Computerized Numerical Control
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DESY	Deutsches Elektronen-Synchrotron
DI	Digital Input
DO	Digital Output
EN	Europäischen Normen
FDM	Fused Deposition Modeling
FH	Forschung Hochenergiephysik (Bereich am DESY)
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FLASH	Freie-Elektronen-Laser

Symbol	Bedeutung
GF-PA	Glasfaser-Polyamid-Verbund
H1	Detektor am HERA-Beschleuniger
HERA	Hadron-Elektron-Ring-Anlage
ITk	Inner Tracker (Innerer Spurendetektor)
LHC	Large Hadron Collider, Teilchenbeschleuniger am CERN
Linac II	Linear accelerator (Linearbeschleuniger)
MLAB	Maschinenlabor im FH-Bereich
MPP	Mesophasen-Pech
PA	Polyamid
PAN	Polyacrylnitril
PE	Polyethylen
PES	Polyester
Petal	Blütenblatt, Tragstruktur für Siliziumsensoren im Detektor
PETRA III	Positron-Elektron-Tandem-Ring-Anlage, dritte Ausbaustufe
PIA	Positronen-Intensitäts-Akkumulator
PP	Polypropylen
PLA	Polyactid
PLM	Product Lifecycle Management
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVA	Polyvinylalkohol
SiC	Siliziumkarbid
SLA	Stereolithografie
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
TPU	Thermoplastisches Polyurethan
UD	unidirektional (in eine Richtung)
W-Boson	W = weak (engl.) = schwach, Boson ist ein Elementarteilchen
XFEL	X-Röntgenlicht Freie-Elektronen-Laser
Z-Boson	Elementarteilchen, ohne elektrische Ladung
ZEUS	Detektor am HERA-Beschleuniger
ZM31	Zentralwerkstatt am DESY

Formelzeichenverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit
A_O	Dehnsteifigkeit oberer Deckschicht	N
A_U	Dehnsteifigkeit unterer Deckschicht	N
b	Breite	mm
B	B-Feld	T (Tesla)
D	Energiedosis durch ionisierte Strahlung/ Strahlungsdosis	Gy
d	Durchmesser	mm
E	E-Modul	N/mm ²
E	Energie	eV
E	E-Feld	V/m
F	Frequenz	Hz
g	Erdbeschleunigung	m/s ²
g_k	Gewichtung	
t	Zeit	s, h
t_O	Dicke obere Deckschicht	mm
t_U	Dicke untere Deckschicht	mm
L_R	Reißlänge	km
m	Masse	g, kg
M	Moment	Nm
N	Normalkraft	N
n	Anzahl	

Symbol	Bedeutung	Einheit
P_i	Wertung von Einzelvarianten	
Q	Querkraft	N
Q	Wärmeleistung	W
t	Materialdicke	mm
T	Temperatur	°C
S	Sicherheitsfaktor	
R	elektrischer Widerstand	Ω
R_e	Streckgrenze (elastische Verformung)	N/mm ²
R_m	Zugfestigkeit (plastische Verformun)	N/mm ²
U	Umfang	mm, m, km
X_0	Strahlungslänge	cm
Z	Kernladungszahl	
α	horizontaler Neigungswinkel Werkzeugkopf	°
γ	vertikaler Drehwinkel Werkzeugkopf	°
ϱ	Dichte	kg/m ³
τ	Schubspannung	N/mm ²
σ	Zugspannung	N/mm ²
ν	Querkontraktionszahl/ Poissonzahl	
\mathcal{L}	instantane Luminosität	1/(cm ² · s)
\mathcal{L}	integrierte Luminosität	fb ⁻¹
Φ	spezifische E-Modul	km

1 Einleitung

1.1 Motivation

Wissen „was die Welt im Innersten zusammenhält“. Johann Wolfgang von Goethe.

Dieser Frage gehen Wissenschaftler der Hochenergiephysik aus der ganzen Welt nach und untersuchen mit Hilfe von Großexperimenten die Grundlagen der Bausteine der Materie, den Elementarteilchen. Für diese und weitere Fragestellungen werden Teilchenbeschleuniger und -detektoren von Ingenieuren und Wissenschaftlern entwickelt und gebaut. Die besonderen Anforderungen an die hochpräzisen Detektoren ermöglichen es, Teilchenkollisionen mit einer Genauigkeit von 100 μm darzustellen. Da so gut wie keine Komponente als Fertigteil auf dem Markt verfügbar ist, wird viel Aufwand in die Entwicklung und den Bau von Detektorstrukturen investiert. Diese Arbeit soll die Fertigung von ebenen Faser-Verbund-Schalen automatisieren und damit eine Vereinfachung im Produktionsprozess ermöglichen.

1.2 Aufgabenstellung

Im Rahmen des ATLAS-Detektor Upgrades am LHC in Genf werden die vorhandenen Endkappen durch leistungsfähigere Siliziumsensoren ersetzt. Hierin werden neuentwickelte Sandwich-Tragstrukturen integriert, auf deren Oberfläche sich moderne Siliziumchips befinden. Diese neue Sensorgeneration sorgt dafür, die Aufnahmequalität vom ATLAS-Detektor zu erhöhen. Die Sandwich-Tragstrukturen, genannt Petals, wurden am DESY in Hamburg entwickelt und werden für die Serie auch teilweise dort gebaut. Jedes Petal besteht aus zwei sogenannten Facings, den Deckschichten des Sandwich. Diese werden aktuell im Handlaminierverfahren gefertigt und anschließend im Autoklaven ausgehärtet. Zur serienreifen Produktion der Facings soll ein Roboter entwickelt und gebaut werden,

der den Laminierprozess übernimmt bzw. erheblich vereinfacht. In der Thesis soll das gesamte Konzept eines solchen Roboters betrachtet werden. Das betrifft die Entwicklung sowie Konstruktion eines geeigneten Roboters inklusive Werkzeugkopf zum automatisierten Legen von Prepreg. Verwendet wird ein 6“ - oder 12“ -breites UD-Tape, welches sich auf Rollen befindet. Die Konstruktion erfolgt in einem CAD-System und wird mit Hilfe eines PLM-Systems (PLM - Product Lifecycle Management) verwaltet. Die Planung mit externen Firmen (z.B. Zulieferer für Steuerung und Linearantriebe) zum Realisieren einer kompletten Maschine sind in der Entwicklungsarbeit inbegriffen. Des Weiteren soll die Maschine gefertigt und getestet werden. Die Maschinenarbeiten zum Fertigen der einzelnen Komponenten sind nicht Aufgabe der Thesis. Die Programmierung der Steuerung soll soweit erfolgen, dass das Funktionsprinzip sichtbar ist. Eine komplette Automatisierung ist nicht zwingend erforderlich.

1.3 Aufbau der Arbeit

Um den Hintergrund der eingesetzten Komponenten nachvollziehen zu können, wird zunächst die Forschung in der Teilchenphysik erläutert. Der Stand der Technik zeigt die aktuelle manuelle Fertigung von ebenen Faser-Verbund Bauteilen. Des Weiteren werden hier die Ideen zur automatisierten Verarbeitung anschaulich erläutert. Diese nun getesteten Prinzipien und weitere Ansätze werden im Konzeptionierungsteil zu einem Gesamtentwurf vereint. Daraus ergeben sich viele Baugruppen, die in einer Gesamtkonstruktion gebündelt werden. Aus diesen theoretischen Überlegungen erfolgt schließlich die Realisierung eines automatisierten Roboters. Anschließend werden die Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst und bewertet.

2 Forschung in der Teilchenphysik

2.1 DESY

DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) ist ein weltweit führendes Forschungsinstitut und Teil der Helmholtz-Gemeinschaft, dem 18 Forschungs-Zentren angehören. Das DESY mit Sitz in Hamburg-Bahrenfeld und Zeuthen bei Berlin beschäftigt ca. 3000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter und arbeitet unter anderem an der Entwicklung, dem Bau sowie dem Betrieb von Teilchenbeschleunigern. Diese Großanlagen dienen der theoretischen und praktischen Erforschung von diversen Problemstellungen. So wird mit den Großanlagen Grundlagenforschung betrieben, um Erkenntnisse über die Struktur der Materie zu gewinnen, Materialien mit Hilfe von Röntgenstrahlen zu untersuchen, mikrobiologische Prozesse zu analysieren und viele weitere gesellschaftsrelevante Technologien voranzutreiben. Eines der jüngsten und bekanntesten Forschungsergebnisse: „Das Mainzer Unternehmen BioNTech SE, der Entwickler eines der ersten Corona-Impfstoffe, forscht an PETRA III nach Möglichkeiten, die noch junge Klasse von RNA-Impfstoffen zu verbessern“ [18]. DESY betreibt mehrere Teilchenbeschleuniger, die in der Luftaufnahme 2.1 des Hamburger Campus eingezeichnet sind.

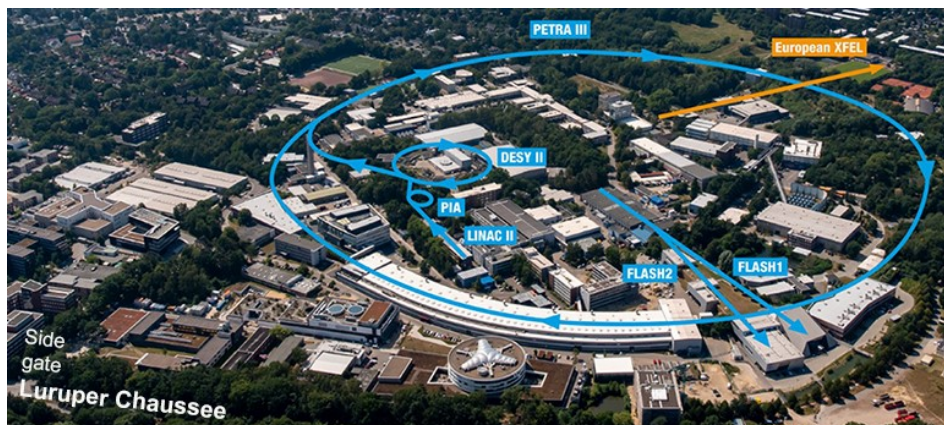


Abbildung 2.1: DESY Campus August 2020 [33]

2.2 Teilchenbeschleuniger

Ein Teilchenbeschleuniger ist ein Großgerät, welches geladene Teilchen (z.B. Elektronen oder Protonen) mit Hilfe elektrischer Felder (E-Feld) bis zur annähernden Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Starke Magnetfelder in sogenannten Ablenkmagneten (B-Feld) halten dabei die Teilchen auf Kurs. Starke elektrische Felder bestimmen ihre Bewegungsenergie (Kinetische Energie), die ein Vielfaches ihrer Ruheenergie beträgt [9]. Am Anfang jedes Beschleunigers steht die Ionenstrahlquelle, in der die Teilchenpakete erzeugt werden. Ein hoher Strom zwischen einer Kathode und Anode erzeugt ein Plasma und das darin eingeleitete Gas wird ionisiert [35]. Im Fall der Anwendung am DESY werden Elektronen erzeugt. Hierbei werden freie Elektronen aus einem erhitzten Draht mit Hilfe von elektrischen Feldern (Klystrons und Cavities) beschleunigt und in Linear- bzw. Kreisbahnen gelenkt [21]. Dies geschieht in den Beschleunigern LINAC II, PIA, DESY II und letztendlich dem Speicherring PETRA III. Dieser hat einen Umfang von 2,3 km. Hierin werden hochbrillante Röntgenstrahlen, die beim Ablenken des Elektronenstrahls in Undulatoren entsteht, durch die 25 Beamlines auf sogenannte Fixed-Target-Experimente (feststehender Probenkörper) geleitet. Bei Petra III sind dieses Messhütten, in denen die Experimente aufgebaut sind [10].

2.3 Teilchenphysik am DESY

– von HERA zur LHC-Beteiligung

Bis zum Jahr 2007 hat DESY an der Untersuchung von Protonen gearbeitet. Dabei wurden in der Großanlage HERA (Hadron-Elektron-Ring-Anlage) mit einem Umfang von 6,3 km Elektronen- und Protonenpakete (in entgegengesetzter Richtung) auf annähernd Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und in den beiden Experimenten (H1 und ZEUS) zur Kollision gebracht, sogenannte Collider-Experimente (collide - zusammenstoßen). „Als Super-Elektronenmikroskop ermöglicht HERA den Physikern dabei den weltweit schärfsten Blick ins Proton“ [6]. „Diese Ergebnisse sind nicht nur wichtig für das Verständnis der grundlegenden Eigenschaften der Materie, sie sind auch eine essentielle Basis für Experimente an Protonenbeschleunigern wie dem LHC (LHC - Large Hadron Collider) am CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) in Genf“ mit einem Umfang von 27 km [19]. Nach Abschluss der erfolgreichen HERA Experimente im Jahr 2007 beteiligt sich DESY an der LHC-Teilchenphysik.

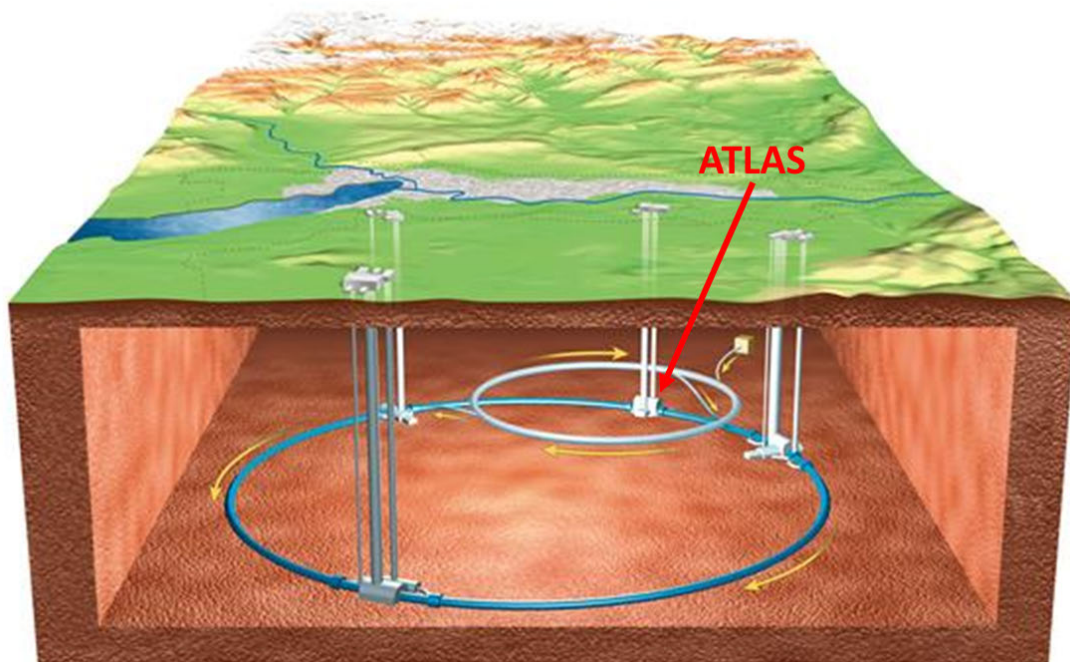


Abbildung 2.2: Darstellung des LHC-Teilchenbeschleuniger am CERN [3]

Im LHC werden Teilchenpakete aus Protonen oder Ionen in zwei entgegengesetzten Kreisbahnen beschleunigt und im Experiment, dem Detektor, zur Kollision gebracht [12] [15]. Insgesamt stehen vier Großexperimente (ATLAS, ALICE, LHC-B, CMS) zur Verfügung, die jeweils um den Kollisionspunkt aufgebaut sind. DESY beteiligt sich am ATLAS-Experiment mit einem ca. hundertköpfigen Team sowie auch am CMS-Experiment. Ein Teil des vorhandenen Detektors, der sogenannte Inner Tracker, wird im Jahr 2026 durch eine Neuentwicklung ersetzt. Nötig wird dies durch eine Modifizierung des LHC-Teilchenbeschleunigers und damit eine Erhöhung der Luminosität, diese steigt um den Faktor 100 von $\mathcal{L} = 10^{32}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ auf $\mathcal{L} = 10^{34}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$. In mehreren Ausbaustufen wurde auch die Energie von $E = 7 \text{ TeV}$ (2008-2013) auf $E = 13 \text{ TeV}$ ab 2015 erhöht. Die Luminosität beschreibt die Anzahl an Teilchenkollisionen pro Fläche und Zeit. Die wirklich interessanten Protonen-Protonen Kollisionen sind mit ca. 20 pro Paket-Kollision jedoch sehr viel kleiner [38]. Die verwendeten Materialien sind der enormen Strahlung nicht mehr gewachsen und müssen ersetzt werden.

2.4 Detektortechnik

Bei der Kollision von den hochenergetischen Teilchen entstehen durch deren Wechselwirkung neue Teilchen, deren Untersuchung Gegenstand der experimentellen Teilchenphysik ist. Diese werden in Detektoren nachgewiesen. Ein Zustand, der kurz nach dem Urknall geherrscht hat. Um eine hohe Luminosität zu erreichen, kollidieren die Protonen am LHC mit einem zeitlichen Abstand von 25 Nanosekunden. Aus den Spuren, die die erzeugten Teilchen im Detektor hinterlassen, können Rückschlüsse auf das, was bei der Kollision passiert ist, gezogen werden. Ein Teilchendetektor an einem Collider (Teilchenbeschleuniger an dem Teilchen in entgegengesetzter Richtung laufen und im Experiment kollidieren) ist typischerweise in Schalen unterteilt, siehe Abbildung 2.3. Die innerste Schale, der sogenannte Spurendetektor, dient der Vermessung der Teilchenspuren geladener Teilchen im Magnetfeld. Hierdurch lassen sich ihr Ursprung, Impuls und Ladung bestimmen. Die inneren Schalen bestehen aus Siliziumstreifen- und -pixeldetektoren. Beim Durchqueren hinterlassen die Teilchen elektrische Ladung, welche zum Nachweis genutzt wird. Ein Magnetfeld sorgt für eine Beugung der Teilchenbahnen, wobei der Radius proportional zum Impuls ist und sich dieser sowie die Ladung bestimmen lassen. Danach werden die Teilchen in einem Kalorimeter gestoppt und die kinetische Energie bestimmt. Des Weiteren lassen sich im Kalorimeter auch ungeladene Teilchen detektieren. Aus diesen lässt sich zusammen mit dem zuvor vermessenen Impuls ihre Masse ableiten, wodurch die Art des erzeugten Teilchens bestimmt werden kann. Lediglich Myonen dringen bis in die außen liegenden Myonenkammern vor, wo ihr Impuls genauer vermessen wird. Der Impuls der für den Detektor unsichtbaren Neutrinos wird über den in der Messung «fehlenden» Impuls bestimmt [4] [1].

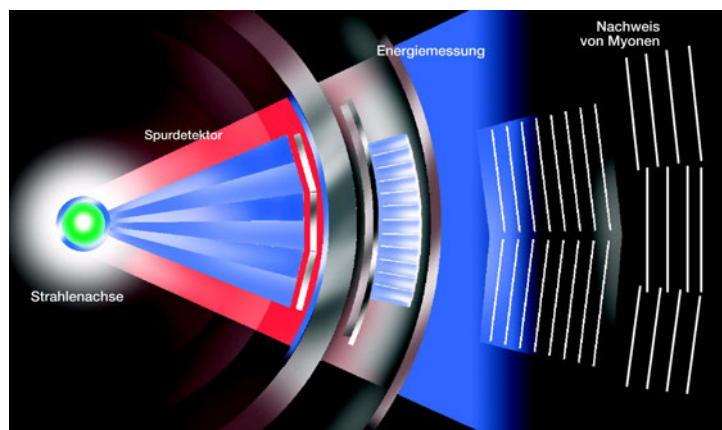


Abbildung 2.3: Schematischer Aufbau eines Detektors in der Hochenergiephysik [4]

2.5 ATLAS-Detektor

Der Name des ATLAS-Detektors rührt aus seiner torusförmigen Struktur und steht für *A Toroidal LHC Apparatus*. Dieser ist in der Abbildung 2.4 dargestellt. Der Detektor ist der jemals größte gebaute Teilchendetektor an einem Beschleuniger und ist, wie oben beschrieben, in viele Subdetektoren eingeteilt. Die in dieser Arbeit im Detail betrachteten Petals sind Bausteine der Endkappe und gehören zum Kern des Detektors, dem sogenannten Inner Tracker (ITk). Dieser Teil dient zur Vermessung der geladenen Teilchen [16]. Das Upgrade-Team der ATLAS-Gruppe am DESY beschäftigt sich mit dem Bau einer Endkappe (grün umrandet) vom ITk. Die Gruppe entwickelt und baut die sogenannten Petals und alle dazugehörigen Werkzeuge. Das Petal wird im Abschnitt 2.5.3 näher beschrieben.

2.5.1 Ereignis im ATLAS-Detektor

Wie der Pixelsensor einer digitalen Spiegelreflexkamera (Standard Sensorgröße Spiegelreflexkamera: 24x16 mm) besteht auch der Teilchendetektor aus diversen Pixel- und Streifensensoren. Bei einer Kamera handelt es sich um eine ebene Sensorfläche, die ein zweidimensionales Bild aufnimmt. Beim Teilchendetektor werden die ebenen Sensoren zwiebelförmig um den Kollisionspunkt angeordnet, sodass ein räumliches Bild aufgenommen wird. Nahe am Kollisionspunkt befinden sich die hochauflösenden Pixel-Detektoren (20,5 x 40 mm) und weiter außen die Streifendetektoren (100 x 100 mm) [16]. In der Abbildung 2.5 ist der mittlere Siliziumstreifensensor komplett bestückt als Modul zu sehen, welcher später ohne (rote) Trägerplatine auf das Petal geklebt wird.

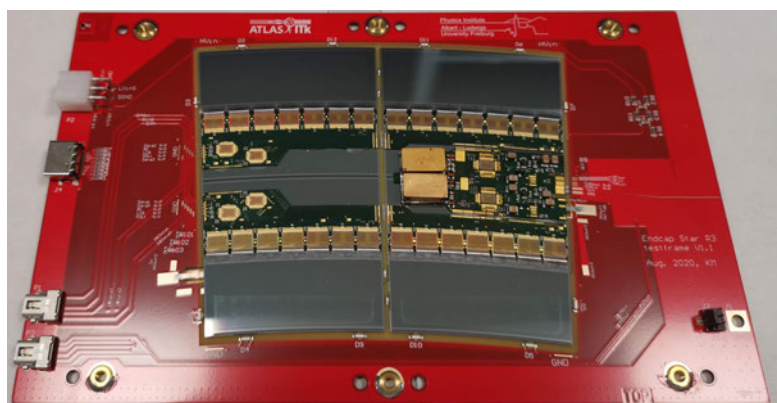


Abbildung 2.5: Prototyp des R3 Stripsensors

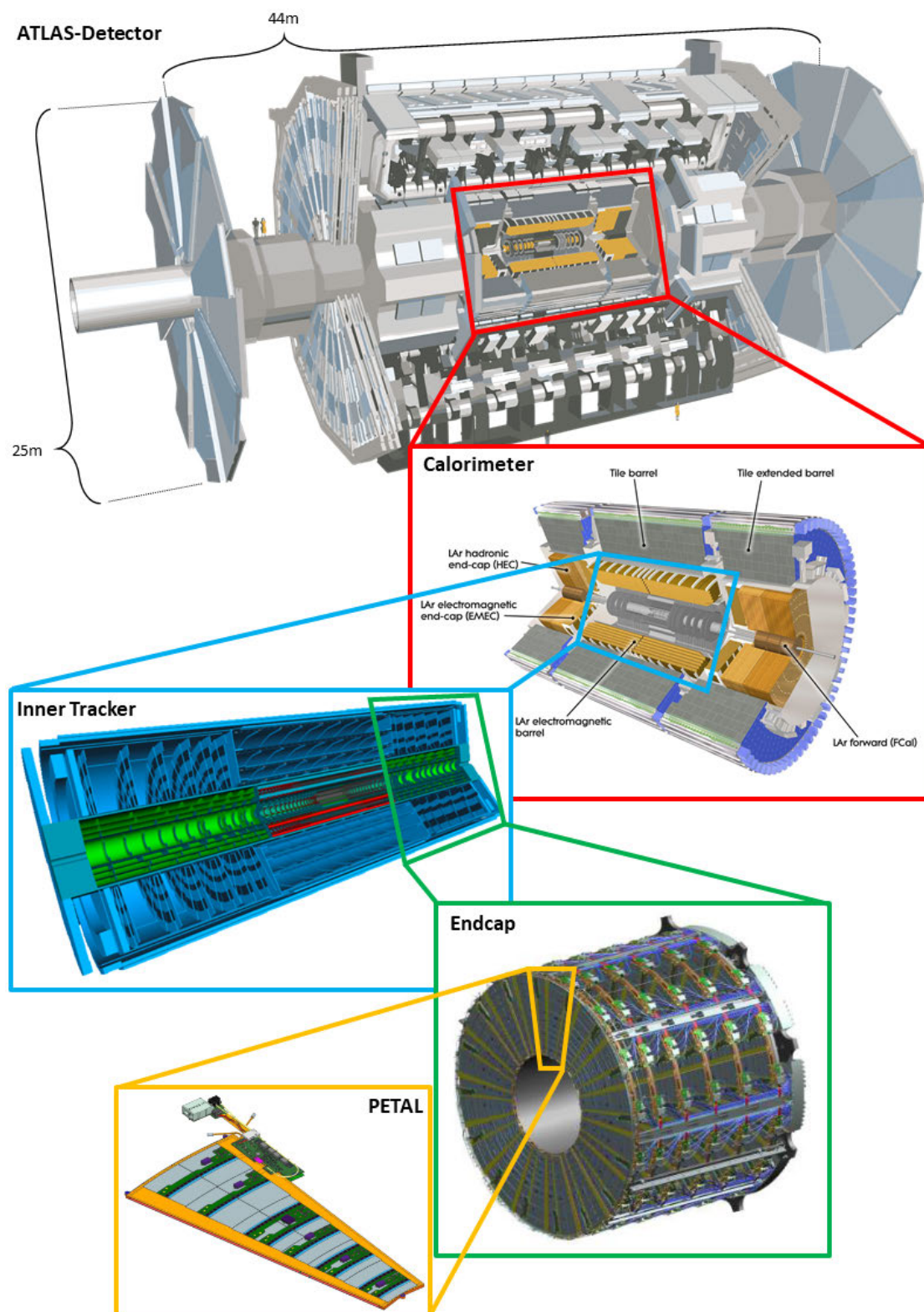


Abbildung 2.4: ATLAS-Detektor im Überblick, Einzelnachweise zu Bildern [36] [16] [12] [24] [32]

Um eine grobe Vorstellung zu einem aufgenommenen Bild des Detektors bzw. zu dem Funktionsprinzip zu erhalten, ist ein sogenanntes Event, also eine Aufnahme von einer Kollision, in der Abbildung 2.6 dargestellt.

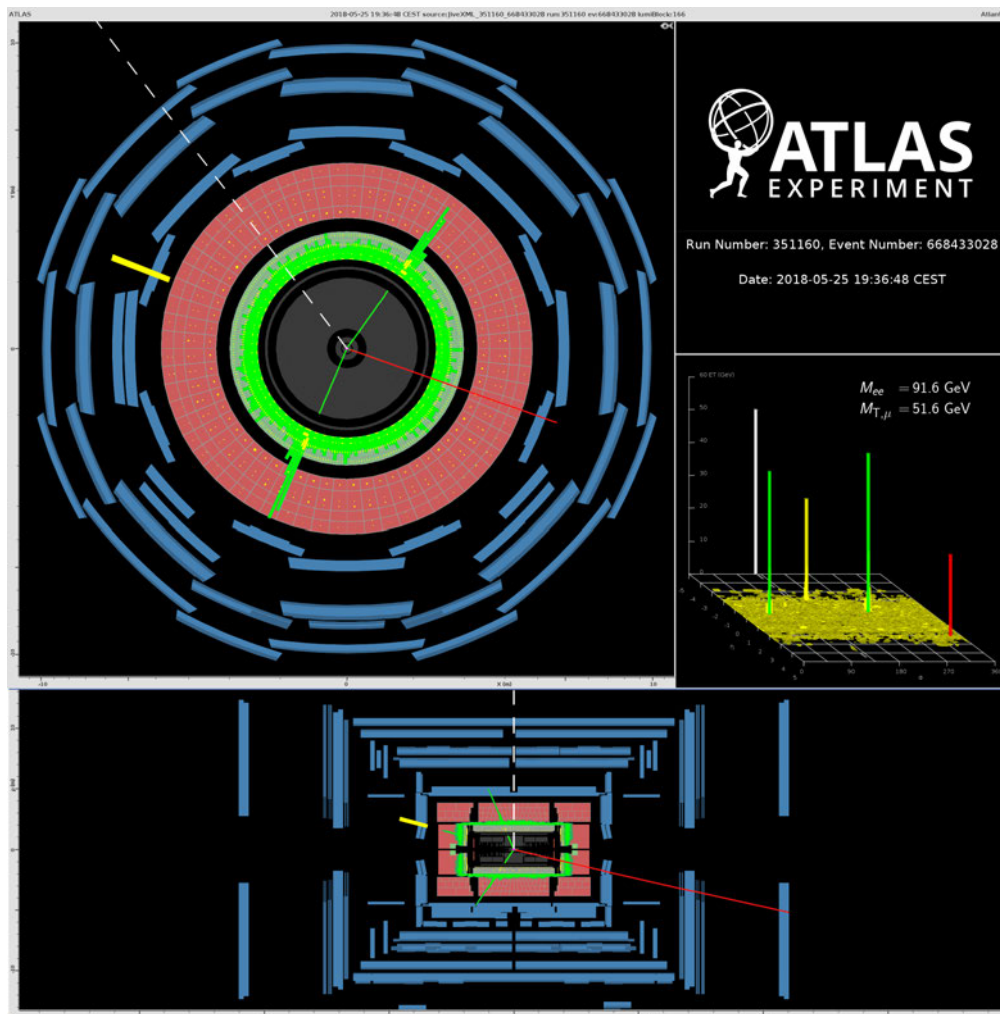


Abbildung 2.6: Dieses Kollisionsereignis zeigt deutlich drei Spuren: ein W-Boson, ein Z-Boson und ein Photon [20].

2.5.2 Materialeigenschaften im Detektor

Die eingesetzten Materialien müssen strahlungshart sein, Temperaturen von $T = -35 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ standhalten und eine besonders geringe Masse aufweisen. Jedes Petal gibt durch seine Elektronik eine maximale Wärmeleistung von ca. $Q = 100 \text{ W}$ ab, die durch die

CO_2 -Leitungen abgeführt wird. Da die Leistungsfähigkeit der Sensoren mit Aufnahme der Strahlungsdosis abnimmt, werden die Sensoren bei $-35^\circ C$ betrieben, da die Schädigungen bei geringen Temperaturen verlangsamt werden. Durch die Strahlenschäden steigen die Leckströme im Sensor, wodurch wiederum die Wärmeerzeugung steigt. Bei höheren Temperaturen fließen wiederum höhere Ströme und somit steigt wiederum die Wärmeleistung, wenn nicht genügend gekühlt wird. Der obere Temperaturbereich von $T = 40^\circ C$ wird bei Ausfall des Kühlkreislaufes erwartet. Als Temperaturmedium wird CO_2 verwendet, welches als Zweiphasengemisch (flüssig/ gasförmig) eingesetzt wird. Die isotherme Verdampfung in der Kühlleitung des Petals sorgt für eine gleichförmige Temperatur aller Sensoren [13]. Strahlungshärte beschreibt im Allgemeinen, dass Materialien und Bauteile, die einer erhöhten Strahlungsdosis ausgesetzt sind, ihre Eigenschaften und somit ausreichenden Funktion im Rahmen der Spezifikation beibehalten. Je näher die Komponenten am Kollisionspunkt liegen, desto höher ist ihre Strahlungsbelastung. „Die Strahlungsdosis, welche die Detektoren in der Nähe der Wechselwirkungszone in zehn Jahren verkraften müssen, beträgt $n = 10^{15}$ Teilchen pro Quadratcentimeter oder $D = 600$ kGy (kGy - Kilogray). Zum Vergleich: Dies ist zwei Milliarden Mal mehr als die bei einer Röntgenaufnahme der Lunge absorbierte Strahlendosis [11].“

Wichtigste Materialanforderungen

Die geringe Masse ist besonders für die Qualität der zu nehmenden Daten wichtig. Je mehr Masse sich im Streufeld der Teilchen befindet, desto höher ist ihre Bremswirkung und Streuung, also die Abweichung von der ursprünglichen Bahn. Hierdurch wird die Messqualität negativ beeinträchtigt. Die Strahlungslänge eines Materials X_0 beschreibt dabei den Energieverlust beim Durchgang eines Teilchens durch die Materie. Besonders die Bremsstrahlung hat dabei einen hohen Einfluss. Die Strahlungslänge ist proportional zur Kernladungszahl Z eines Elements, $X_0 \propto Z^{-2}$. Die Kernladungszahl oder im Periodensystem Ordnungszahl genannt, beschreibt die Anzahl an Protonen im Atomkern [43][42]. Insbesondere Metalle müssen daher auf Grund ihrer hohen Dichte und somit einer hohen Bremswirkung vermieden werden. Je höher die Dichte der durchdrungenen Bahn eines Teilchen ist, desto mehr kinetische Energie wird abgebaut und desto mehr streuen die Teilchen. Man versucht das Material-Budget, also viel Volumen und Materialien mit hoher Bremswirkung, so klein wie möglich zu halten. Aus diesen Gründen ist die Verwendung von Verbundwerkstoffen mit ihren geringen Dichten und sehr hohen Festigkeiten besonders geeignet. Da diese Materialien aber oft eine deutlich geringere

Strahlungsfestigkeit aufweisen, wird ein hoher Aufwand betrieben, geeignete Materialien zu erforschen. Die Brandgefahr, ausgelöst durch die verwendeten Kunststoffe, wird durch das Spülen des Detektors mit Stickstoff minimiert, brennbare Epoxy-Harze sind dennoch strikt verboten [16]. Ebenfalls sollen halogenhaltige Materialien vermieden werden.

Tabelle 2.1: Wichtigste Materialanforderungen des Petal [41]

Spezifikation	Randbedingung	Wert	Prüfmethode
Temperatur: Auslegungsbereich, Tiefstwert	geringste Temperaturen zum Kühlen der Leitungen inkl. Fehlerfälle, höchste Temperaturen während der Inbetriebnahme Vorhergesehene Temp. während des Betriebs	$-56\text{ }^\circ\text{C} < T < 70\text{ }^\circ\text{C}$ (min/max) $-38\text{ }^\circ\text{C} < T$	Temperaturzyklen der Petal-Struktur mit Prototypen und mechanischen Tests Thermische Analysen mit Modulen
Strahlungsdosis nach $\mathcal{L} = 4000\text{ fb}^{-1}$	Dosis mit einem Sicherheitsfaktor S=1,5	810 kGray	Repräsentatives Muster mit allen verwendeten Materialien, wird nach Bestrahlung geprüft
mechanische Unversehrtheit	Temperaturzyklen über Lebenszeit n=100		Prototypen getestet
Gewicht	Kühlleitung komplett inkl. elektrischen Isolator	$225\text{ g} < 250\text{ g} < 275\text{ g}$	Waage
1. Eigenmodfrequenz	Im eingebauten Zustand, vollständig zwangsbedingt	$> 50\text{ Hz}$	FEA und Tests mit Prototypen
Delaminierung	zwischen Deckschichten und Kern		
lokale Ebenheit	im Bereich der Module 10 cm x 10 cm	$\leq 50\text{ }\mu\text{m}$	optische Messmaschine
mech. Deformation durch Temperaturänderung	im Bereich der Module 10 cm x 10 cm	$\leq 100\text{ }\mu\text{m}$	optische Messmaschine
Lagetoleranz von Petal Lagerung	max. Abweichung in alle Richtungen	$< 25\text{ }\mu\text{m}$	optische Messmaschine
elektrischer Widerstand	über die Dicke und über die Länge	$< 10\text{ }\Omega\text{DC}$	Multimeter

2.5.3 Aufbau des Petals

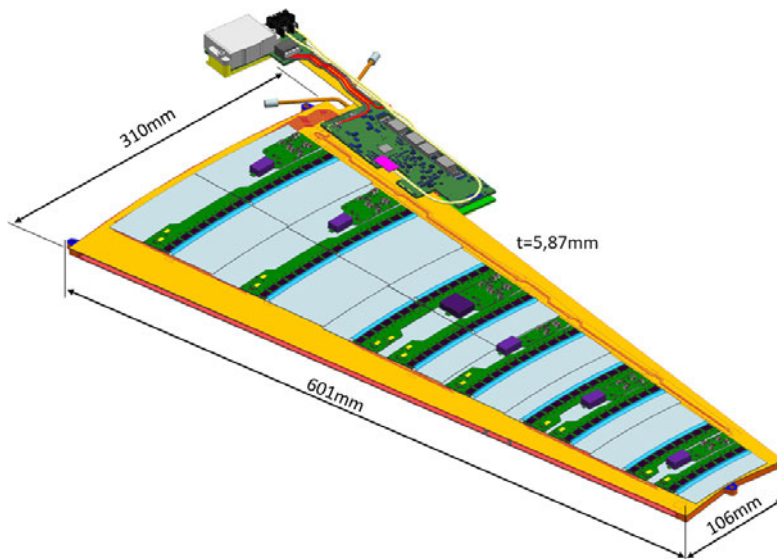


Abbildung 2.7: Isometrische Ansicht des Petals [36]

Das sogenannte Petal, welches seinen Namen auf Grund der Blütenblatt ähnlichen Anordnung erhielt, ist eine Verbundkonstruktion, auf deren Außenseiten die Halbleiterstreifendetektoren aufgebracht sind. Die Streifendetektoren mit ihrer Ausleseelektronik zusammen werden Module genannt, welche den Durchgang von Teilchen messen. Auf jedem Petal befinden sich 12 Module mit insgesamt 18 Sensoren (Vorder- und Rückseite). Diese werden in 5 (6 bei Planungsbeginn der Thesis) Scheiben (Discs) in der sogenannten Endkappe eingebaut. Jede Scheibe trägt 32 Petals, 16 auf der Vorder- und 16 auf der Rückseite. Insgesamt werden somit 160 Petals pro Endkappe benötigt, von denen jeweils eine am Ende des Inner Trackers (ITk) montiert ist, sprich zwei Endkappen insgesamt.

Die Tragstruktur zur Aufnahme der Module wird Core (Kern) genannt - eine sehr leichte ($m = 250 \text{ g}$) und steife, in Sandwichbauweise, gefertigte Struktur.

Das Sandwich besteht aus (siehe Abbildung 2.8):

- Deckschichten (Facing)
 - 0°-CFK-Lage (CFK - carbonfaserverstärkter Kunststoff/ Kohlenstoffaserverstärkter Kunststoff)
 - 90°-CFK-Lage
 - 0°-CFK-Lage
 - Bustape (Kaptonlagen mit Kupferleiterbahnen) zur Spannungsversorgung sowie zum Datentransport
- Honigwabenkern (Honeycomb) aus CFK
- Kühlleitung aus Titan eingebettet in
 - Graphitschaum (Thermal foam)
 - Thermisch leitender Kleber (Hysol), siehe Anhang A.7
- Abschlussleiste zur mechanischen Aufnahme aus Torlon (Close-out)
- Abschlussleiste seitlich, gefertigt im Spritzgussverfahren, Material unbekannt, Eigenentwicklung der Firma AVS

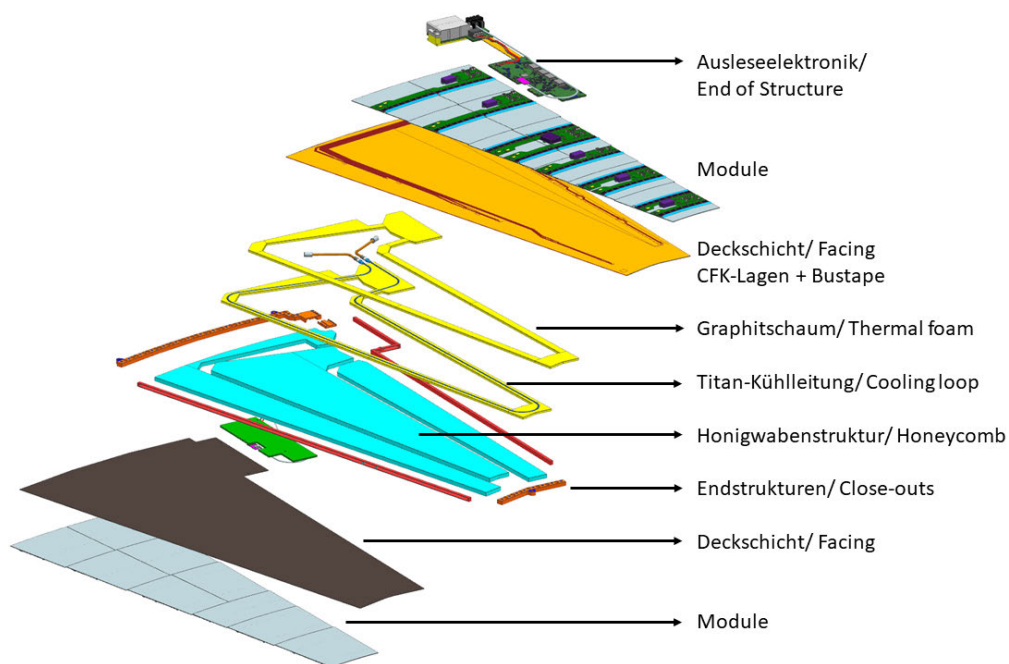


Abbildung 2.8: Explosionsansicht Petal [36]

Die Entwicklung und Fertigung der Petal-Prototypen fand im Zeitraum zwischen 2014 und 2022 am DESY in Hamburg statt. Hier wurde die mechanische sowie die thermische Leistungsfähigkeit anhand von mehreren Prototypen optimiert. Ebenso wurden in dieser Zeit die benötigte Infrastruktur zur Realisierung der Serienfertigung hergestellt. Hierzu gehören zwei Reinräume, ein Faserverbundlabor, ein Maschinenraum mit Autoklave und zugehörigem Equipment. Die Serienproduktion startete im 1. Quartal 2023 und läuft bis ca. 2025. Dabei werden in Zusammenarbeit mit Industriepartnern Cores gebaut und mit Modulen bestückt, die ebenfalls zu einem großen Teil vor Ort am DESY und anderen kooperierenden Instituten gefertigt werden. Dazu gehören die Institute: DESY Zeuthen, Dortmund, Freiburg, Kopenhagen, Lund, Prag, Valencia, Vancouver, Toronto und Adelaide, die fertig bestückte Module zum DESY Hamburg und Freiburg schicken, um dort die Cores zu bestücken und somit ein fertiges Petal zu bauen.

3 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird die bisher verwendete manuelle Fertigung der Deckschichten in dem Abschnitt [3.1 Prepreg-Autoklav-Verfahren](#) beschrieben. Von diesem Stand aus soll, wie in der Aufgabenstellung [A.1](#) beschrieben, ein automatisierter Prozess entstehen. Industriell verwendete Verfahren bzw. Anlagen werden in dem Abschnitt [3.2 Grundlagen Prepreg-Lager](#) dargestellt. Als Zusatzinformation wird das Grundprinzip einer Sandwichstruktur in dem Abschnitt [3.3](#) erläutert. Die Grundlagen der Faser-Kunststoff-Verbunde und die Auswahl des verwendeten Materials werden im Abschnitt [3.4](#) betrachtet.

3.1 Prepreg-Autoklav-Verfahren

Wie bereits im Abschnitt [2.5.3](#) erläutert, werden für die Deckschichten des Petals drei CFK-Lagen verwendet. Zur Anwendung kommen unidirektionale Prepreg-Lagen (UD-Tapes). Unidirektionale Fasern sind Endlosfasern, die parallel zueinander in eine Richtung verlaufen. Prepreg ist die Abkürzung für preimpregnated fibers - vorimprägnierte Fasern. Es sind textile Faserhalbzeuge, die mit einem speziellen Reaktionsharz vorimprägniert sind [\[39\]](#). Diese Lagen werden zur Zeit manuell auf das vorher angeraute Bustape gelegt. Das Ablegen des Prepregs soll durch einen automatisierten Prozess vereinfacht werden.

Auf einer CFK-Platte wird eine Trennfolie abgelegt, die verhindert, dass austretendes Harz die Werkzeugplatte verunreinigt. Darauf wird das Bustapes abgelegt und mit Klebeband fixiert, anschließend folgen die drei Prepreg Lagen. Um für den späteren Prozess eine gute Klebeanhaftung zu erhalten, folgt ein Abreißgewebe. Darauffolgend liegt eine weitere Trennfolie und ein Saugfließ. Die Folie sorgt dafür, dass das Harz nicht aus dem Bauteil gesogen wird und die Fasern frei liegen. Das Saugfließ saugt nur an den überstehenden Rändern des luftdurchlässigen Abreißgewebes die Luft ab, der Austritt an Harz ist minimal. Eine Vakuumfolie, welche an den Rändern der CFK-Platte mit einem Vakuumdichtband (tacky tape) abgedichtet wird, dient zur Evakuierung des Aufbaus. Anschließend wird das Bauteil im Autoklaven ausgehärtet. Der Prozess (Aufbau

jeder Schicht im Autoklaven) ist in der Abbildung 3.1 nachzuvollziehen. Die dargestellte CFK-Druckplatte (6) ist optional.

Prepreg wird verwendet, da es die bestmöglichen zu erreichenden Bauteileigenschaften bietet. Die Fasern werden als imprägniertes unidirektionales Gelege - auf Rollen aufgewickelt - geliefert. Das bedeutet, dass die Matrix, also das Harz, schon um die Fasern eingebettet ist. Hierdurch erspart man sich ein aufwendiges Auftragen des Harzes. Da das industriell hergestellte Material einen sehr hohen Faservolumenanteil von 60 % besitzt, lassen sich Bauteile mit einer hohen Festigkeit herstellen. Durch eine handwerkliche Imprägnierung lassen sich diese hohen Faservolumenanteile nicht erzielen. Der Autoklav stellt bei der Herstellung von Faserverbunden ein wichtiges Werkzeug dar, welches es ermöglicht, prozessicher Bauteile in gleicher Qualität herzustellen. Es handelt sich um einen regelbaren Druckbehälter, dessen Innenraum unter Druck gesetzt werden kann, seine Innentemperatur geregelt sowie das Gelege mit Hilfe eines Vakuumschlusses evakuiert werden kann. Durch das Vakuumieren und den Außendruck werden die Fasern dicht zusammengedrückt sowie Luftteinschlüsse herausgesogen. Durch den Außendruck verringert sich die Faserwelligkeit, wodurch sich die Festigkeit und Steifigkeit des Bauteils erhöht. Durch eine Erwärmung auf $T = 121\text{ °C}$ wird das thermisch aushärtbare Harz zu einem hohen Kristallisationsgrad gebracht [40]. In der Abbildung 3.2 sind die Arbeitsschritte des Handgeleges dargestellt.

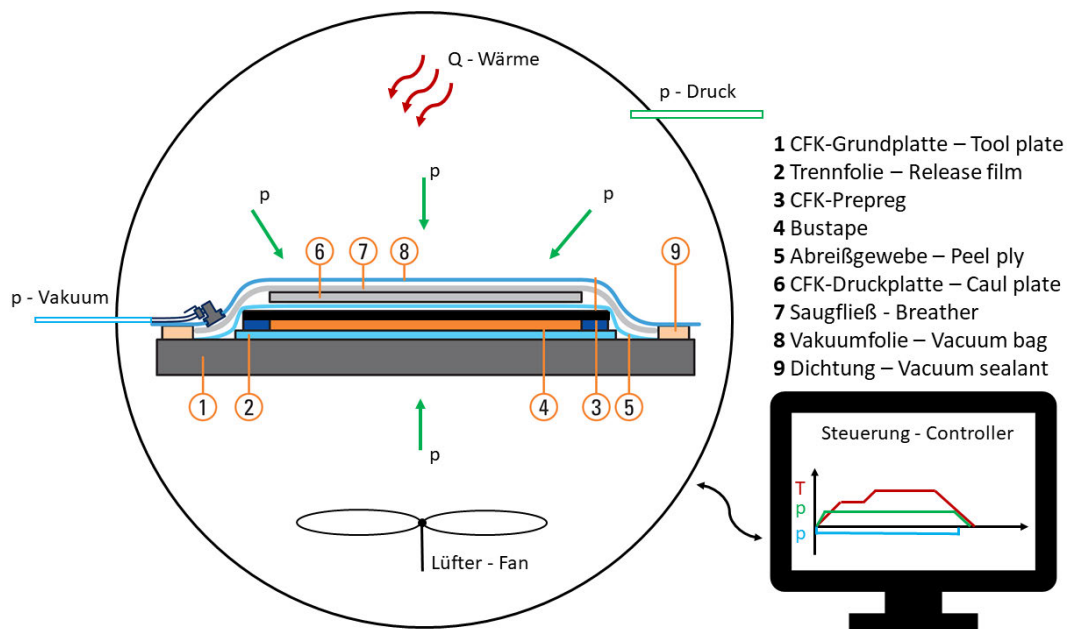


Abbildung 3.1: Schema Autoklav, Einzelnachweis Lagenaufbau A.6

Fertigung einer Deckschicht/ Facing



(a) Gelegeaufbau

(b) Vakuumaufbau



(c) Autoklav

(d) Ausgehärtetes Facing

Abbildung 3.2: Handgelege vom Petal

Die fertige Deckschicht ist in der Abbildung 3.2 unten rechts zu sehen.

3.2 Grundlagen Prepreg-Leger

In der industriellen Fertigung von Faserverbundbauteilen kommen vor allem in der Luftfahrt und der Automobilindustrie automatisierte Ablegeverfahren von vorimprägnierten Fasermaterialien zum Einsatz. Dabei haben automatische Tapeleger (ATL - automated tape laying) und Fiber-Placement-Anlagen (AFP - automated fiber placement) zum manuellen Ablegen Qualitäts- und Produktivitätsvorteile:

- Lagenpositionierung und Wiederholgenauigkeit
- Ablegegeschwindigkeit
- Gleichmäßiges und luftblasenfreies Vorkompaktieren etc.

Bei beiden Verfahren kommen Prepregs zum Einsatz, die auf Rollen aufgewickelt sind. Mit den breiten Tapes bei ATL-Anlagen von 3" (56,2 mm), 6" (152,4 mm) und 12" (304,8 mm) sind einfache Konturen wie Schalen, so z.B. das Seitenleitwerk des A350, realisierbar. Auf Grund der Breite lassen sich die Fasern nicht gut um Kurven legen (geringe Drapierbarkeit), weshalb für komplexere Bauteile das AFP-Verfahren zum Einsatz kommt. Diese Tapes haben eine Breite von 1/8" (3,175 mm), 1/4" (6,35 mm) und 1/2" (12,7 mm). Das AFP-Verfahren lässt sich z.B. für doppeltgekrümmte Konturen wie Rumpfpänele einsetzen. Die höhere Flexibilität ist auch bei der Herstellung von variablen Laminatdicken, wie z.B. bei Stringern, einsetzbar [31].

3.2.1 Funktionsweise vollautomatisierter CFK-Tapeleger

Nach den erläuterten Grundlagen von Tapelegern soll nun der Aufbau von ATL-Anlagen (siehe Abbildung 3.3) näher gezeigt werden, was essentiell für die weiteren Ausführungen ist. Durch die ebene Bauform der zu fertigenden Deckschichten und dem verwendeten Prepreg von 6" oder 12" ist das ATL-Verfahren für die betrachtete Anwendung ideal. Die AFP-Anlagen werden hier nicht weiter betrachtet, da ihr Aufbau für den vorgesehenen Zweck zu aufwendig und die zu verwendende Tapebreite für dieses Verfahren ungeeignet ist.

Auf einer Materialrolle wird das zu verarbeitende Faser-Matrix-Halbzeug (Prepreg auf Trägerpapier) vom Hersteller oder Lieferanten geliefert und in die Maschine eingelegt. Anschließend wird das Material zwischen den Transportrollen eingefädelt und auf der

Trägerpapierabwicklung wieder aufgewickelt. Das Prepreg wird durch die Kompaktierungsrolle auf der Ablageform angedrückt und durch einen Heizstrahler erwärmt. Hierdurch verringert sich die Viskosität und somit steigt die Klebrigkeit (engl. tag) der Matrix und das Prepreg haftet somit auf der Ablagefläche. Das Trägerpapier zieht das Prepreg zur Ablage und hält es auf Spannung. Das Trennen des Prepregs vom Trägerpapier kann entweder vor dem Ablegen erfolgen oder direkt an der Kompaktierungsrolle selbst. Das Ablängen des Prepregs erfolgt mit einer Schneidvorrichtung auf der Trägerschicht, wobei diese nicht durchtrennt werden darf, da sie den Vortrieb des Materials darstellt.



Abbildung 3.3: ATL-Funktionsprinzip (links) und ATL-Ablegekopf von M. Torres Diseños Industriales (rechts) [31]

3.3 Funktion einer Sandwichstruktur

Der bereits erläuterte Aufbau des Petals im Abschnitt [2.5.3 Aufbau des Petals](#) soll nun unter Betrachtung der Sandwichkonstruktion näher beschrieben werden und eine kurze Einführung ins Themengebiet geben. Der Abschnitt ist für das Verständnis der später zu entwickelnden Maschine nicht von Nöten, sondern dient als Hintergrundinformation für den Aufbau des Petals sowie die verwendeten Materialien.

Wie schon in der Einleitung erläutert, handelt es sich bei der Verwendung von Faser-verbundmaterialien um Konstruktionen. Die positiven mechanischen Eigenschaften jedes Materials wird so miteinander kombiniert, dass ein Gesamtverbund entsteht, dessen Eigenschaften wie z.B. Festigkeiten denen der Einzelschicht überragen. Der Aufbau eines Sandwichverbundes sieht wie folgt aus:

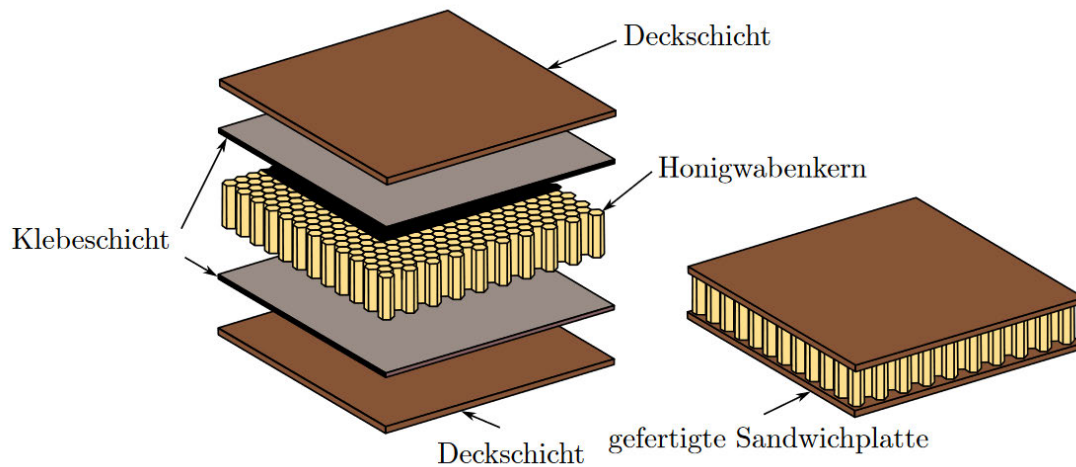


Abbildung 3.4: Aufbau von Sandwichstrukturen [28]

Beim Petal handelt es sich um eine Sandwichstruktur, dessen Ziel es ist, ein sehr steifes und gleichzeitig leichtes Bauteil zu erschaffen. Die Sandwich-Komponenten bestehen aus den beiden Deckschichten, dem Kern und der Klebeverbindung, die den Kern mit der Deckschicht verbindet. Die Funktion der Deckschichten ist die Übernahme des Biegemomentes als Kräftepaar. Der Kern überträgt die Schubkräfte zwischen den Deckschichten und hält diese auf Abstand. Die Steifigkeit des Kerns ist zwar sehr viel geringer als die der Deckschichten, doch ist sie noch so groß, dass ein Zusammendrücken der Struktur verhindert wird. Die Klebeverbindung sorgt für die Übertragung von Schub- und Zugspannungen [30]. In der folgenden Abbildung 3.5 ist dieser Zusammenhang aufgeführt:

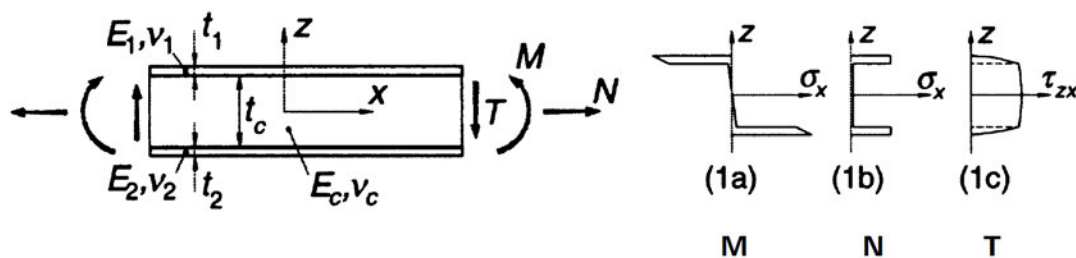


Abbildung 3.5: Zusammenhang zwischen Kräften und Spannungen im Sandwich [30]
 M - Moment, N - Normalkraft, T oder Q - Querkraft, τ - Schubspannung, σ - Zugspannung, E - Elastizitätsmodul, ν - Querkontraktionszahl/ Poissonzahl, t - Materialdicke

In der Strukturmechanik betrachtet man die fachgerechte Dimensionierung von Bauteilen. So soll hier am Beispiel eines Vollquerschnittes die Entwicklung über einen Doppel-T-Träger hin zur Sandwichstruktur gezeigt werden und dessen Leichtbaupotential hervorgehoben werden. Betrachtet man einen biegebelasteten Balken, so erkennt man, dass die höchsten Spannungen in den Rändern liegen. Beim Doppel-T-Träger, auch I-Träger genannt, reduziert man in den spannungsärmeren Bereichen das Material so, dass ein leichtes Bauteil mit hohem Flächenträgheitsmoment und damit einer biegesteifen Struktur entsteht. Beim Sandwich nutzt man dieses Prinzip, wobei der dünnwandige Steg durch einen extrem leichten Füllstoff ersetzt wird. Die Komponenten des Verbundes können dabei verschiedene Materialien aufweisen, siehe Abbildung 3.6. Die Querkraft wird mit Q bezeichnet und das Moment mit M .

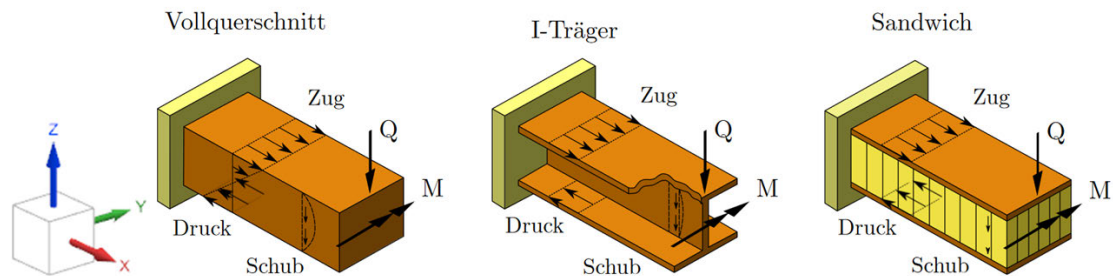


Abbildung 3.6: Entwicklung vom Vollquerschnitt zum Sandwichtaufbau [28]

Wie beim Doppel-T-Träger nehmen die obere und untere Deckschicht Zug- und Druckkräfte auf. Der Kern dient dazu, beide Schichten auf Abstand zu halten und die Schubkräfte aufzunehmen. Dieser wird auf die Deckschichten geklebt und überträgt durch diese Verbindungen die Schubkräfte. Da der E-Modul im Vergleich zu den Deckschichten vernachlässigbar klein ist, übernimmt der Kern keine Normalkräfte, sprich in Plattenebene. Die Steifigkeit ist aber noch so groß, dass ein größeres Zusammendrücken verhindert wird [30]. Der Kern hat eine deutlich geringere Dichte, wodurch sich sehr leichte und trotzdem steife Strukturen erzeugen lassen. Er soll vor allem den zur Oberfläche senkrechten Druck- und Schublasten widerstehen können, sodass sich besonders Werkstoffe mit hohen Drucksteifigkeiten, Schubsteifigkeiten und Schubfestigkeiten in Dickenrichtung eignen [28].

Das Leichtbaupotential der Sandwichstruktur ist in der folgenden Abbildung 3.7 dargestellt:



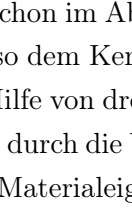
	Monolithisch	Kerndicke t	Kerndicke $3t$
			
Steifigkeit	1.0	7.0	37.0
Biegesteifigkeit	1.0	3.5	9.2
Gewicht	1.0	1.03	1.06

Abbildung 3.7: Relativer Einfluss der Sandwichkerndicke auf die Steifigkeit und das Gewicht des Verbundes [28]

Bei Vergrößerung der Kerndicke erhöht sich das Gewicht bloß um wenige Prozent, doch die Biegesteifigkeit sowie die Steifigkeit um ein Vielfaches. Die Grafik zeigt diesen Zusammenhang sehr anschaulich.

3.3.1 Betrachtung des Petals als Sandwichstruktur

Von der Einzelschicht zum Mehrschichtverbund

Wie schon im Abschnitt 2.5.3 Aufbau des Petals beschrieben, handelt es sich bei dem Core, also dem Kern des Petals, um eine Sandwichstruktur aus einem Mehrschichtverbund. Mit Hilfe von drei UD-Tapes ($0^\circ/90^\circ/0^\circ$) wird ein Kreuzverbund (engl. Cross-Ply) hergestellt, durch die Winkeldifferenz von 90° ist der Kreuzverbund orthotrop (richtungsgebundene Materialeigenschaften). Da in der 0° -Richtung zwei Lagen und in der 90° -Richtung nur eine Lage vorherrscht, entspricht die 0° -Lage der Vorzugs-Steifigkeitsrichtung. Dieses Gelege wurde gewählt, da es die Hauptkraftrichtungen der Deckschichten abbildet und somit den leichtesten zu wählenden Lagenaufbau darstellt. Die Besonderheit dabei sind die extremen Randbedingungen, die ein hohes Maß an Forschung und Recherche an Materialeigenschaften, Verfügbarkeit und den gesamten Herstellungsprozess erforderten.

Übliche Prepregs haben eine Dicke von 0,125 mm - 0,4 mm [40]. Für die Deckschichten wird eine Dicke von lediglich 0,05 mm verwendet. Zwar lässt sich dadurch eine sehr dünne Decklage herstellen, allerdings verkompliziert es auch die Herstellung des Halbzeuges und die spätere Fertigung. So soll eine extrem leichte, dünne und dennoch schwingungsfeste und strahlungsharte Struktur entstehen, die zusätzlich eine hohe thermische sowie elektrische Leitfähigkeit aufweist. Des Weiteren muss die fertige Struktur eine Ebenheit über die gesamte Fläche von $< 250 \mu\text{m}$ aufweisen.

Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung

Zur Erinnerung sind hier nochmal die Grundlagen der Festigkeitslehre aufgelistet, die zum Verständnis der ausgewählten Faser dienen. Der E-Modul E beschreibt den Zusammenhang zwischen Spannung σ und Dehnung ϵ . Vergleicht man unterschiedliche Materialien im Zugversuch, so erkennt man bei gleicher Spannung (Kraft F pro Fläche A), dass deren Dehnung unterschiedlich ist. Je geringer die Dehnung (bei gleicher Spannung) desto größer das E-Modul.

$$\text{E-Modul: } E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3.1)$$

$$\text{Spannung: } \sigma = \frac{F}{A} \quad (3.2)$$

$$\text{Dehnung: } \epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3.3)$$

Bei dem zu fertigenden Petal soll die Steifigkeit bei gleichzeitig minimalem Materialeinsatz so groß wie möglich sein. Durch die geringe Dicke des Kerns von nur $t = 5 \text{ mm}$ müssen die Deckschichten zur Erreichung einer hohen Steifigkeit eine geringe Verformbarkeit aufweisen. Dies erreicht man durch ein hohes E-Modul der Fasern in den Deckschichten – ein wichtiger Wert zur Auswahl des Deckschichtmaterials (siehe hierzu Abbildung 3.8). Die Dehnsteifigkeit A jeder Deckschicht ergibt sich aus dem E-Modul E des verwendeten Materials sowie der Breite b mal der Deckschichtdicke t .

$$\text{Dehnsteifigkeit der Deckschichten: } A_U = E_U \cdot b \cdot t_U \quad (3.4)$$

$$A_O = E_O \cdot b \cdot t_O \quad (3.5)$$

$$A = A_U + A_O \quad (3.6)$$

Der Kern besteht aus einer CFK-Wabenstruktur (engl. honeycomb). Im Flugzeugbau werden überwiegend Aramidpapierwaben (Nomex-Honeycomb) eingesetzt. Auf Grund der benötigten elektrischen und thermischen Leitfähigkeit wird für den Kern eine CFK-Honigwabenstruktur verwendet, die zudem eine höhere Steifigkeit im Vergleich zum Nomex-Honeycomb aufweist [34]. Zur Übertragung der thermischen Leistung von maximal 100 W, die durch die Module auf den Deckschichten verursacht wird, befindet sich eine Titan-Kühlleitung in der Mittelachse. Diese Kühlleitung ist zur Wärmeübertragung mit einem Graphitschaum umgeben, der die thermische Übertragung zwischen Deckschicht und Titan-Rohr verstärkt. In diesem Bereich ist die versteifende Honigwaben-schicht unterbrochen und wird durch den Schaum ersetzt.

3.4 Grundlagen Faser-Kunststoff-Verbund

Im Gegensatz zum klassischen Maschinenbau, in dem überwiegend Metalle zum Einsatz kommen, wird im Detektorbau bevorzugt auf Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) zurückgegriffen. Metalle haben auf makroskopischer Betrachtungsweise in allen Raumrichtungen gleiche Materialeigenschaften, welche auch als Isotropie bezeichnet wird. Für die Festigkeitsbetrachtung sind die Materialeigenschaften Elastizität und Plastizität: Zug-Druckfestigkeit $[R_e]$ $[R_m]$ zu betrachten. Die Steifigkeit eines Bauteil ergibt sich dann aus den Materialeigenschaften sowie der Geometrie. Faser-Kunststoff-Verbunde bestehen aus hochfesten Fasern und einem Kunststoff. Dabei sind die Materialeigenschaften der Fasern richtungsgebunden, also anisotrop. Der verwendete Kunststoff, der um die Fasern gebettet ist, hält die Fasern zusammen und sorgt für die Kraftübertragung zwischen ihnen. Der Kunststoff wird auch als Matrix bezeichnet. Bei geringerer Dichte haben Fasern aus z.B. Kohlenstoff in Längsrichtung eine im Vergleich zu Metallen höhere Festigkeit. 1 kg CFK kann 5 kg Stahl ersetzen [8]. Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) werden zwar als eine Werkstoffklasse betrachtet, sind im eigentlichen Sinne aber Konstruktionen. Ihnen liegt das Wirkprinzip der Verbundkonstruktion zugrunde: Verschiedene Werkstoffe werden derart kombiniert, dass sich Bauteileigenschaften ergeben, die alleine mit Einzelkomponenten nicht erzielt werden könnten. Als Beispiele seien hier Glasfaser-Polyamid-Verbunde (GF-PA) und Kohlenstoffaser-Epoxid-Verbunde (CF-EP) zu nennen [40]. Zur Veranschaulichung sind in der Tabelle 3.1 die Materialeigenschaften einiger ausgewählter Metalle und Faser-Kunststoff-Verbunde aufgelistet.

Tabelle 3.1: Vergleichswerte verschiedener Werkstoffe im Bezug zu CFK [8]

Werkstoff	Einheit	Kiefernholz	Dural-Alu (hochfeste Legierung)	Titan	Stahl	GFK	CFK
Dichte	g/cm ³	0,5	2,8	4,5	7,8	2,1	1,5
Zugfestigkeit	MPa	100	350	800	1100	720	900
E-Modul	MPa	12000	75000	110000	210000	30000	88000
Spez. Festig- keit Reißlänge	km	20	13	18	14	34	60
Spez. E-Modul	km	2400	2700	2400	2700	1400	5900

Da die Reißlänge und der spezifische E-Modul weitestgehend unbekannt sind, wird deren Zusammenhang hier nochmal kurz erläutert. Die Reißlänge L_R beschreibt den Quotienten aus der Zugfestigkeit R_M und dem Produkt aus Dichte und Erdbeschleunigung $\rho \cdot g$. Diese Angabe wird häufig in der Textilindustrie verwendet. Durch das Verhältnis zwischen Zugfestigkeit und Masse lassen sich Materialien auf ihr einzubringendes Eigengewicht vergleichen. Da in der Praxis andere Kriterien wie Kosten, Verarbeitbarkeit oder Beständigkeit in den Vordergrund treten, wird die Reißlänge nur selten angegeben [7].

$$\text{Reißlänge: } L_R = \frac{R_M}{\rho \cdot g} \quad (3.7)$$

Der spezifische E-Modul Φ ist der Quotient aus dem E-Modul E und der Dichte ρ und wird auch als spezifische Steifigkeit bezeichnet [5].

Um einen Faser-Kunststoff-Verbund zu erreichen, werden unidirektionale (UD-Lagen - einachsige) Fasern so aufeinander geschichtet, dass dem Bauteil entsprechend ein geeigneter Kraftfluss entsteht. So werden die Fasern z.B. für Zug belastete Rohre oder Rotorblätter überwiegend in Längsrichtung des Kraftflusses angeordnet, also entlang der Achse. Bei Druckbehältern kann die Faserorientierung mit einer Wickelmaschine optimal auf die Kraftrichtungen angepasst werden und im Übergangsbereich die Lagerichtung und die Materialdicke zwischen Zylinder und Flaschenhals/ -boden angepasst werden. Bei Platten, mit gleichen Materialeigenschaften in der Ebene, werden mehrere unidirektionale Lagen so aufeinander gelegt, dass ein quasi-isotroper Aufbau entsteht - in allen Ebenen-Richtungen gleich. Je mehr Faserorientierungen dabei Verwendung finden, desto homogener die Festigkeit in der Ebene. So ist ein typischer Lagenaufbau zur Realisierung von Schalen und Platten mit 8-Lagen wie folgt: (0° +45° -45° 90° | 90° -45° +45° 0°). In Dickenrichtung, also quer zur Faserrichtung, hat eine solche Platte deutlich geringere

Festigkeiten. Um Spannungen im Bauteil und damit ein Verformen nach dem Aushärten der Matrix zu vermeiden, sollte auf ein symmetrisches Gelege geachtet werden.

Typische Anordnungen sind [40]:

- Kreuzverband (cross-ply laminate) $0^\circ / 90^\circ$
- Ausgeglichener Wickelverbund z.B. $(\pm 10^\circ | \pm 45^\circ | \pm 80^\circ)$
- Flugzeugbau-Laminat $(0^\circ | \pm 45 | 90)_s$ quasiisotrop
- Gewebe (verflochtene unidirektionale Faserbündel)

3.4.1 Faserarten

Im technischen Bereich kommen auf Grund ihrer guten technischen Eigenschaften überwiegend Glas- und Kohlenstofffasern zum Einsatz. Nachfolgend eine Übersicht der möglichen Faserarten:

- Naturfasern: Haare, Wolle, Seide, Baumwolle, Flachs, Sisal, Hanf, Jute, Ramie, Bananenfaser
- Organische Fasern: Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyamid (PA), aromatisches Polyamid - Aramid, Polyester (PES), Polyacrylnitril (PAN), Kohlenstoff
- Anorganische Fasern: Glas, Basalt, Quarz, SiC, Al_2O_3 , Bor, Asbest
- Metallfasern: Stahl, Aluminium, Kupfer, Nickel, Beryllium, Wolfram [40]

Die Herstellung von Carbonfasern erfolgt industriell durch die Pyrolyse (Verkokung) drei verschiedener Ausgangsstoffe: Mesophasen-Pech (MPP, engl. Pitch; Marktanteil: 4%), Viskose (engl. Rayon; Marktanteil: 11%) und Polyacrylnitril (PAN; Marktanteil: 85%). Im Fall von Viskose- und Pech-Fasern ist das Ausgangsmaterial natürlichen bzw. halbnatürlichen Ursprungs und unterliegt signifikanten Zusammensetzungsschwankungen. [14] In der Abbildung 3.8 sind unterschiedliche Fasertypen aufgelistet. In der Grafik wird vertikal die Zugfestigkeit angegeben und horizontal das E-Modul.

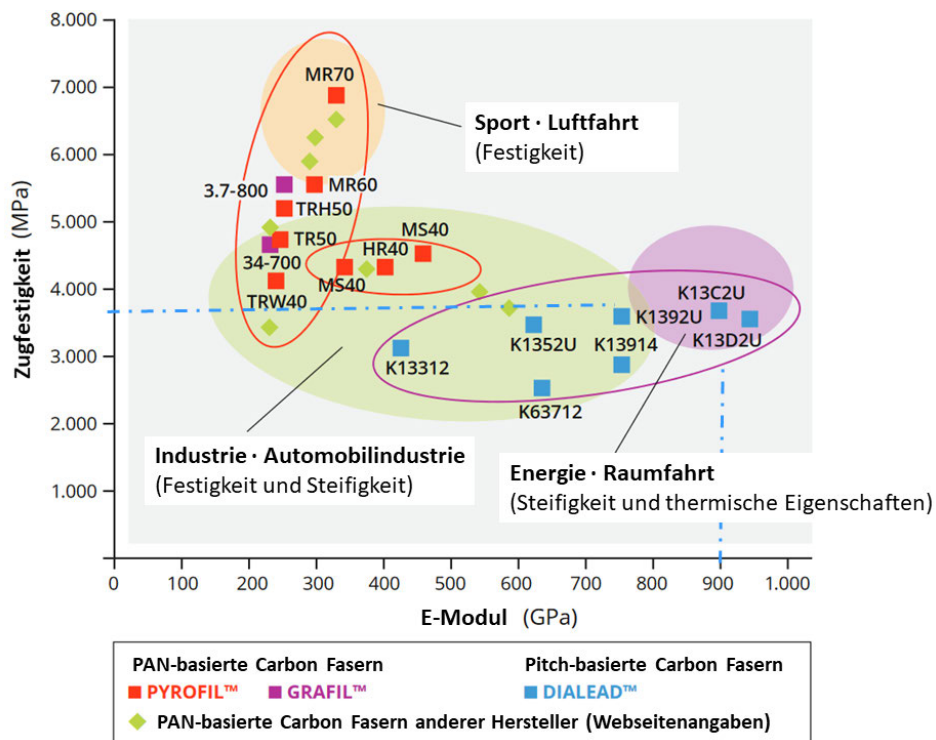


Abbildung 3.8: Eigenschaften von Polyacrylnitril (PAN)- und Mesophasen-Pech (Pitch)-basierten Kohlenstoffasern, übersetzt aus Grafik: [23]

Verwendete Faser in den Deckschichten: K13C2U

Die verwendete Faser des Typs DIALEAD ist eine Hochleistungs-Kohlenstofffaser auf Basis von Mesophasen-Pech, die in einer breiten Palette von Produktformaten mit niedrigem bis sehr hohem Zugmodul erhältlich ist. Hersteller ist die Firma Mitsubishi Chemical Carbon Fiber and Composites, Inc. Der Fasertyp heißt K13C2U und ist in der Abbildung 3.8 mit den Strichlinien hervorgehoben. Auf Grund der guten mechanischen Eigenschaften, wie der des bereits ausführlich beschriebenen E-Moduls sowie der guten Wärmeleitfähigkeit, kommt diese Faser zum Einsatz.

Tabelle 3.2: Materialeigenschaften Faser K13C2U von Mitsubishi CCFC [22]

Fiber Type	Filament Count	Tensile Modulus msi	Tensile Strength ksi	Density lb/in ³	Yield Yd/lb	Thermal Conductivity W/m · K
K13C2U	2K	130	550	0.079	1800	620

Faserart	Faseranzahl	E-Modul Gpa	Zugfestigkeit MPa	Dichte g/cm ³	Garnfeinheit tex(MUL) g/1000m	Wärmeleitfähigkeit W/m · K
K13C2U	2K	900	3800	2,20	270	620

3.4.2 Harzsysteme

Die Grundbausteine von Kunststoffen sind Polymere (polymer - aus vielen Teilen aufgebaut), welche chemische Verbindungen aus zusammengesetzten Makromolekülen sind. Zum Einsatz kommen:

- Duroplaste:
 - Epoxid (EP)-Harze (für hoch beanspruchte Bauteile)
 - Ungesättigte Polyester (UP)-Harze
 - Vinylester (VE)-Harze
 - Phenol-(PF)- Harze (günstiges Verhalten bei Bränden)
 - Polyimide und Bismaleinimide (temperaturbeständig bis 30 °C)
 - Cyanatester-Harze (aus Cyansäure und Bisphenol A)
- Thermoplaste
 - teilkristalline
 - * Polypropylen (PP)
 - * Polyamid (PA)
 - amorphe
 - * Polystyrol (PS)
 - * Polycarbonat (PC)
- Elastomere
 - Kautschuke
 - Silikone (SI)
 - Polyurethane (PUR) [40]

Für hoch beanspruchte Bauteile wie im Flugzeugbau oder Leistungssport finden überwiegend Epoxidharze Verwendung. Bei dem Harzsystem vom Prepreg, welches zur Herstellung der Deckschichten (facings) verwendet wird, kommt ein Cyanatester-Harzsystem zur Anwendung. Dieses hat eine hohe Strahlenbeständigkeit, was auf Grund der Nähe zum Kollisionspunkt im Detektor essentiell ist. Außerdem ist die Aushärtungsgüte und damit die Steifigkeit der fertigen Deckschicht sehr hoch. „Der Aushärtungsmechanismus erfolgt bei diesen Harzen über Polyaddition, der Härter wird in die Polymerkette gleichberechtigt eingebaut. Basis der meisten EP-Harze ist Bisphenol A. Die Vernetzung geschieht mit Härtern, wie polyfunktionellen Aminen, Phenolen, Säureanhydriden usw. Generell kann man zwischen Kalthärtern - also schon bei ca. 20 °C reagierendem Harzsystem - und Warmhärtern (Härtung etwa oberhalb 80 °C) unterscheiden [40].“

Verwendetes Harzsystem im Prepreg EX-1515

Bei dem verwendeten Harzsystem EX1515 (siehe Datenblatt [A.6](#)), welches in dem verwendeten Prepreg vorherrscht, handelt es sich um ein warmhärtendes Harzsystem.

„Das Toray EX-1515 Cyanatester-Prepreg-Harzsystem ist einzigartig in der Branche, da es einen extrem hohen Aushärtungsgrad bei einer Temperatur von $T = 121\text{ °C}$ (250 °F) erreicht. Dieser Grad der Umwandlung sorgt für optimale mechanische Eigenschaften, hohe Strahlungsbeständigkeit, geringe Feuchtigkeitsabsorption und geringe Ausgasung bei gleichzeitiger Beibehaltung einer unvergleichlichen Zähigkeit, einer niedrigen 118 °C (244 °F) spannungsfreien Temperatur und eine lange Aushärtezeit. Das Harzsystem zeichnet sich durch seine Widerstandsfähigkeit gegen Mikrorisse aus, selbst wenn es thermischen Zyklen und hoher Strahlenbelastung ausgesetzt ist. EX-1515 weist außerdem niedrige dielektrische und niedrige Verlustwerte auf, wodurch es sich hervorragend für Radom- und Antennenanwendungen eignet. EX-1515 kann nachgehärtet werden, um die thermische Leistung für temperaturkritische Strukturen zu erhöhen [17].“ Auf Grund dieser Eigenschaften ist es das Material der Wahl.

4 Konzeptionierung eines Prepreg-Legers

Aus dem vorhandenen manuellen Fertigungsprozess, der in dem Abschnitt [3.1 Fertigung einer Deckschicht/ Facing](#) beschrieben ist, soll nun ein automatisierter Prozess entwickelt werden. Hierfür werden die Anforderungen an solch einen Prozess aufgelistet und deren Umsetzbarkeit in einfachen Versuchen ermittelt. Mit einem Bewertungsverfahren werden anschließend mögliche Lösungen und Teillösungen miteinander verglichen und zu verschiedenen Gesamtkonzepten zusammengefasst.

4.1 Anforderungen

Für die Konzeptionierungsphase werden aus der Aufgabenstellung (siehe [A.1](#)) die gesamten definierbaren Aspekte als Anforderungen aufgelistet bzw. detailliert. Diese werden zusammen mit dem Auftraggeber, dem Konstrukteur und den späteren Anwendern definiert. Um die Anforderungen an eine geeignete Konstruktion festzulegen, werden diese tabellarisch in der Anforderungsliste, auch Lastenheft genannt, festgehalten (nach dem Skript von Prof. Hoder [\[29\]](#) angelehnt an das Buch Konstruktionslehre von Pahl/ Beitz [\[37\]](#)). Hierin werden die Randbedingungen des zu verarbeitenden Materials festgehalten und die nötigen Eigenschaften der Maschine beschrieben. Es sollen alle Randbedingungen aufgelistet werden, ohne zu starke konstruktive Vorgaben oder Einschränkungen vorzudefinieren. Durch die Gewichtung der Einzelaspekte werden dem Konstrukteur Vorgaben auferlegt. Diese sind abgestuft von Forderungen, die zwingend eingehalten werden müssen bis hin zu Wünschen, die Berücksichtigung finden sollen. Die Wünsche werden dabei in vier Kategorien eingeteilt, von W1 = wenn möglich, über W2 = interessant, W3 = wichtig, bis hin zu W4 = sehr wichtig. In der Tabelle [4.1 Anforderungsliste](#) sind alle Punkte aufgeführt.

Tabelle 4.1: Anforderungsliste

F= Forderung W4= sehr wichtig W3= wichtig W2= interessant W1= wenn möglich		Anforderungsliste für Prepreg-Roboter		Erstellt am: 22.04.2023 von: S. Ahrens Blatt 1 von 1	
Lfd.	F / W	Anforderung	Wert/ Einheit/ Bezeichnung	Änderung	
<u>Technische Funktionen</u>					
Ablage von UD-Prepreg auf einer Platte als Gelege, Beschreibung des Tapes und des Geleges					
1	F	UD-Tape Typ	Toray EX1515 K13C2U		
2	F	UD-Tape Breite	6" (152,4mm) oder 12" (304,8mm)		
3	W3	Rollengröße vom Tape	unbekannt, üblich Ø 300mm, B=350mm		
4	F	Gelegeaufbau	0° / 90° / 0°		
5	F	Baugröße CFK-Ablageplatte	1400mm x 800mm x 4mm		
6	F	Gelegegröße/ Mindestverfahrweg	~ 1200mm x 650mm		
7	W3	Mindestfertigungszahl an Platten (entspricht 4 Facings)	5 Stück		
8	F	Spalt zwischen den Prepreg-Bahnen	≤ 0,2mm		
9	F	Winkeltoleranz	≤ 0,5°		
<u>Technologie</u>					
10	F	Maschinenumgebung: Gebäude 43a			
11	W3	Verwendung der vorhandenen Energie: Elektrizität	U= 400V/ 230V		
12	W3	Verwendung der vorhandenen Energie: Druckluft	Druckluft max. p=10bar		
13	W1	Verwendung der vorhandenen Energie: Vakuum falls nötig	Vakuum p=0,1bar		
14	W3	Erwärmen der Ablegeplatte	T=35°C - 45°C		
15	W4	Modularer Aufbau			
16	W3	Einfache Montage Werkzeugkopf an Roboter			
17	W4	Demontierbarer Werkzeugkopf			
<u>Halbautomatisch</u>					
18	W2	Handlaminieren ermöglichen, z.B. um Verschnitt zu verringern oder Reststücke zu verarbeiten			
19	W4	Einrichten der Maschine (Parameteranpassungen, Justage)			
20	W3	Einlegen in Materiallager per Hand (Rolle oder Zuschnitte)			
21	F	Initialisierung und Überwachung des Prozesses durch Bediener			
<u>Vollautomatisch</u>					
22	F	Ablegen des Prepregs auf Ablageplatte			
23	W3	Schnitt des Prepregs falls nötig			
<u>Wirtschaftlichkeit</u>					
24	W2	Kostenoptimiert	< 20.000 €		
25	W3	Fertigung von Bauteilen bevorzugt beim DESY	MLAB und ZM31		
26	W3	Verdrahtung und Programmierung bevorzugt beim DESY	ELAB		
27	W3	Montage/ Justage und Inbetriebnahme mit einfachem Equipment			
28	W2	Geringe Technologievielfalt (ähnl. Steuerungen, Motoren usw.)			
<u>Mensch-Produkt-Beziehungen</u>					
29	W4	Personensicherheit nach Maschinenrichtlinie	2006/42/EG		
30	W1	Montagefreundlich, ohne Sonderwerkzeug montierbar			
31	F	Bedienungsanleitung			
32	W2	Anwenderfreundlich, Bedienung über Schaltpult oder ähnliches			
33	W2	Einfaches Einlegen des Prepregs in Materiallager	< 10 min		

4.2 Versuche zum werkzeuggestützten Ablegen von Prepreg

Um das Ablegen des Prepregs auf einer Platte zu vereinfachen, sind zunächst diverse Optimierungsmöglichkeiten betrachtet worden. Bei der Recherche wurde auch die Firma Carbon-Werke Weißgerber GmbH & Co. KG kontaktiert, von denen einige Halbzeuge gekauft wurden. In einem Telefonat mit dem Geschäftsführer, Herrn Franz Weißgerber, wurde das Vorhaben erläutert und die Anwendung von Wärme diskutiert. Die Vermutung, dass Wärme das Ablegen des Prepregs vereinfachen würde, konnte bestätigt werden und auch der Temperaturbereich ($T = 30\text{ °C}$ bis 40 °C) konnte eingegrenzt werden, sodass nach diesen Vorgaben eine Heizplatte gebaut wurde. Die Heizplatte sorgt dafür, dass sich die Matrix erwärmt, sich die Viskosität verringert und das Prepreg auf der Heizplatte haften bleibt. In Versuchen konnte gezeigt werden, dass sich die Ablage, egal ob manuell oder maschinell, vereinfachen lässt.

Erster Versuch: Vorgeschnittenes Material

Als erste Idee wurde versucht das vorhandene Equipment zu nutzen, um die Produktivität zu erhöhen und den Verschnitt des Prepregs zu verringern. Mit Hilfe der vorhandenen Schneidmaschine, Pattern Cutter genannt, sind zunächst passgenaue Streifen geschnitten worden, die der Kontur von zwei ineinander verschachtelter Bustapes ähnelt (siehe Abbildung 4.1).

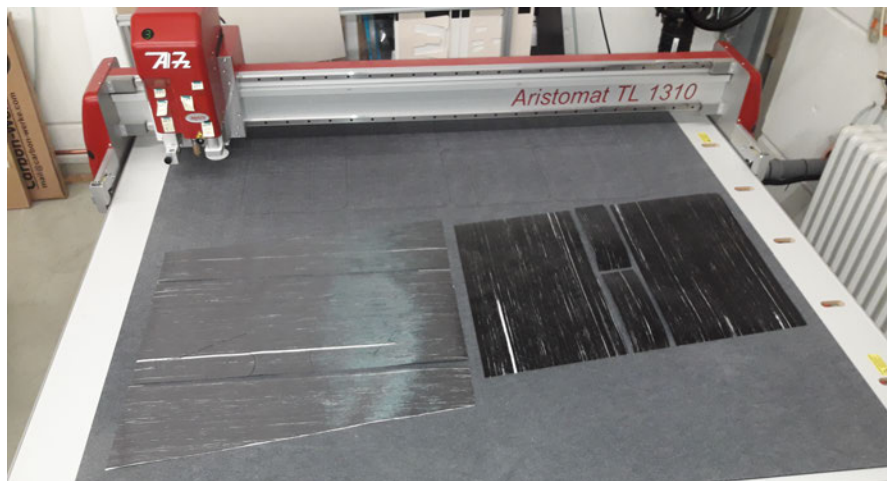


Abbildung 4.1: Prepreg-Vorschnitt



(a) Ablage

(b) Anordnung

Abbildung 4.2: Vorgeschnittenes Prepreg

Anschließend entsteht daraus ein Gelege, bei dem die Streifen nur noch an die passende Stelle gelegt werden müssen und das Trägerpapier entfernt wird. Die Abbildung 4.2 stellt eine Ablage dar, in der zwei gleiche Facings (right hand) verschachtelt gefertigt werden. Diese Idee wurde anfänglich verfolgt, da der Materialvorrat sehr gering war und selbst Fehlstellen aus dem Prepreg geschnitten wurden und durch passgenaue Prepreg-Streifen ersetzt wurden, um möglichst viele Facings zu produzieren. Dieses Prinzip lässt sich auf einen Pick & Place-Roboter übertragen. Dieser könnte die vorgeschrittenen Teile, gefertigt mit dem Pattern Cutter, aus einem Vorratsregal entnehmen und auf der Platte ablegen. Die Schwierigkeit besteht genau wie bei der händischen Ablage in dem Entfernen der Trägerfolie.



Abbildung 4.3: Versuch: Aufwickeln vom Trägerpapier

Um das Entfernen des Trägerpapiers zu erproben, wurde ein weiterer Test durchgeführt. In der Abbildung 4.3 ist dieser zu sehen. Das Trägerpapier wird mit Hilfe eines PTFE-Rundstabes aufgewickelt, welcher einen Durchmesser von $d = 20$ mm aufweist. Auch dieser einfache Versuch trägt zum Erforschen von möglichen Mechanismen bei, die ein Werkzeug realisieren lassen. Auch hier wird die Heizplatte verwendet, um zu sehen, welchen Einfluss diese auf das Ablösen des Trägerpapiers hat und um die Haftung an der Ablage zu erhöhen.

4.3 Entwicklung eines Werkzeugkopfes zur Aufnahme und Ablage von Prepreg

Zweiter Versuch: Abrollmechanismus

Ein weiterer Versuch wurde mit Hilfe eines eigen entworfenen Handrollers unternommen. Zur Veranschaulichung ist der Mechanismus in der Abbildung 4.4 dargestellt. Mit Hilfe von industriellen Transportrollen wird das Material geführt. Auf der oberen rechten Rolle (1) befindet sich das Prepreg mit Trägerpapier. Dieses wird beim Abrollen über die untere Umlenkrolle (2) geführt und an die beheizbare Ablegeplatte angedrückt. Somit haftet das Prepreg an der Ablegeplatte. Anschließend läuft das Trägerpapier über ein Blech mit kleiner Rundung (3), wodurch sich das Prepreg vom Trägerpapier löst. Dies geschieht, da das Prepreg biegesteif ist und nur leicht an dem Silikontrennpapier haftet. Das Trägerpapier wird an der oberen linken Rolle (4) aufgewickelt. Die beiden oberen Rollen sind über einen Keilriemen synchronisiert. Da der Radius der Materialrolle mit $r = 30\text{ mm}$ recht klein ist, konnte das Prepreg nicht beschädigungsfrei aufgenommen werden. Beim Aufwickeln liegt das Trägerpapier auf der Innenseite der Rolle und das Prepreg darauf. Hierdurch entstehen zwei unterschiedliche Krümmungsradien, das ein Stauchen der inneren Lage bewirkt und somit Beulen in dem Trägerpapier auftreten. Hierdurch wird das Prepreg nicht mehr auf dem Träger gehalten und bricht sehr leicht. Das Grundprinzip zum Lösen und Ablegen der Fasern auf der Heizplatte konnte allerdings demonstriert werden.

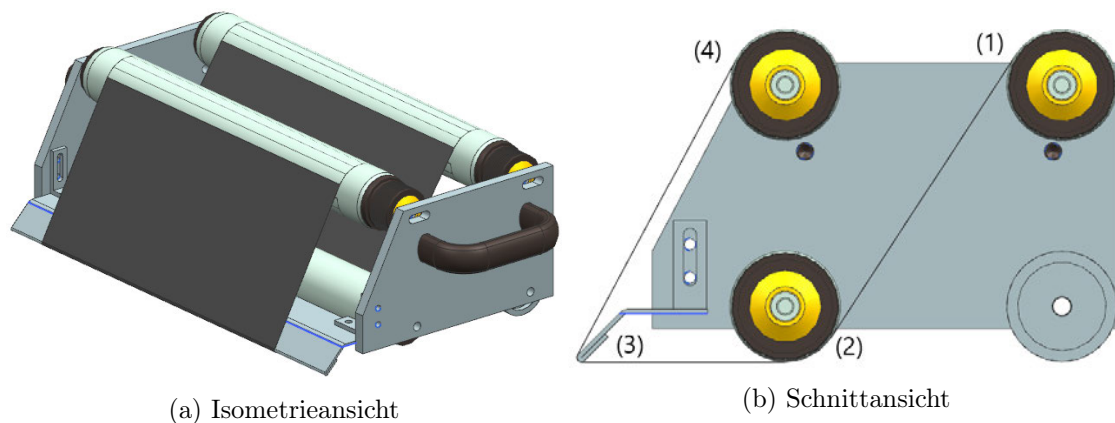


Abbildung 4.4: Übersicht des ersten Prototypen

Um die Probleme aus dem ersten Prototypen zu beseitigen, entstand ein neuer Prototyp mit einer Aufnahme für die uns gelieferte Prepreg-Rolle. Wie in der Abbildung 4.5 zu sehen ist, gelang das Legen vom Prepreg auf der Ablegeplatte. Die Synchronisation geschieht in dieser Version zwischen Andrückrolle und Aufwickelrolle für das Trägerpapier. Das Trennen von Trägerpapier und Prepreg geschieht hier wie beim ersten Prototypen über eine Umlenkung. Hier allerdings vor der Andrückrolle, sodass das Prepreg zwischen diesen beiden Rollen mit Hilfe eines Skalpellts geschnitten werden kann. Dies ist für einen kompletten Werkzeugkopf entscheidend, da das Trägerpapier als Antrieb dient und nicht zertrennt werden kann. Das grundlegende Prinzip einer erfolgreichen Ablage mit Hilfe eines Werkzeuges konnte bestätigt werden.

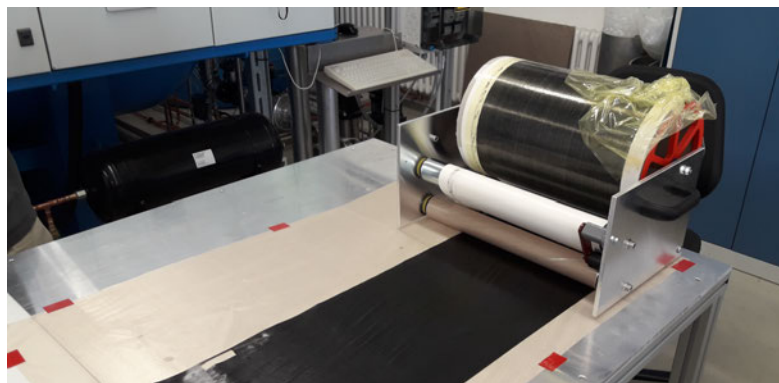



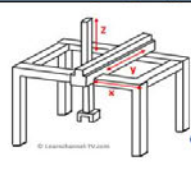




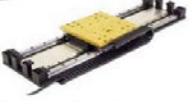








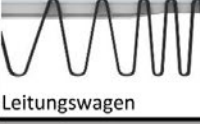
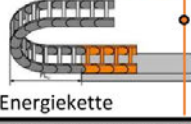









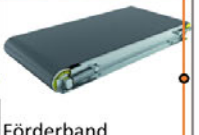




Abbildung 4.5: Zweiter Prototyp: handgeführtes Werkzeug

4.4 Auswahl geeigneter Bewegungsapparate








Zur Lösungsfindung wird der „Morphologische Kasten“ verwendet. Dazu ist zunächst das Gesamtprinzip in Teilsysteme zu untergliedern und diese wiederum in einzelne Funktionen. Bei dieser Methode werden für jedes Teilproblem mehrere Funktionsprinzipien aufgelistet. Durch die Verbindung sinnvoller Kombinationen von Einzellösungen entstehen verschiedene Gesamtkonzepte. Diese schematische Darstellung zeigt die Vorgehensweise der Lösungsfindung. Anschließend werden diese bewertet und die priorisierte Lösung weiterentwickelt. Hierfür wird das Wertigkeitsverfahren verwendet.

4.4.1 Morphologischer Kasten














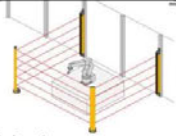
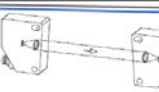

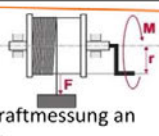





Tabelle 4.2: Lösungsmatrix (Einzelnachweise:[2])

		geeignete Teillösung			
Teilfunktionen		Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
1. Bewegungsapparat					
1.1	Grundprinzip	 Gelenkroboter	 Portalroboter mit Prepregrolle	 Pick & Place Roboter für Zuschnitte	 Linearroboter mit bewegtem Tisch
1.2	Führung	 Zahnriemenachse	 Spindelachse	 Linearmotorachse	 Achse mit Kugelumlaufspindel
1.3	Über-setzung	 Planetenwinkelgetriebe	 Planetengetriebe	 Schneckengetriebe	ohne Getriebe
1.4	Antrieb	 Servomotor	 Schrittmotor	 Linearmotor	 Gleichstrommotor
1.5	Energieübertragung	 Leitungswagen	 Energiekette	 Kabelschlauch	 Schleifschiene
2. Werkzeugkopf					
2.1	Materialaufnahme	 6" Prepreg auf Rolle	 12" Prepreg auf Rolle	 vorgeschnittene Bahnen	 Streifen fertiger Kontur
2.2	Ablage/Transport Material	 Transportrollen	 Vakuumsauger	 Vakuumsaugplatte	 Förderband
2.3	Antrieb Material	 Trommelmotor	 Servomotor mit Riementrieb	 Schrittmotor mit Riementrieb	 Gleichstrommotor mit Riementrieb

4 Konzeptionierung eines Prepreg-Legers

2.4	Schwenk- einheit	 Pneumatischer Schwenkantrieb	 Pneumatischer Hubzylinder mit Umlenkung 0°/ 90°	 Schwenkantrieb 0- 360° mit Elektrom.	 Rundtisch mit Antrieb
2.5	Lagerung Schwenk- einheit	 Drehkranzlager	 Axialkugellager	 integriert in Schwenkantrieb	 integriert im Rundtisch
2.6	Hubeinheit	 Pneumatikzylinder	 Elektrozylinder	 Pneumatischer Schwenkantrieb	 Schwenkantrieb 0- 360° mit Elektrom.
2.7	Lagerung Hubeinheit	 Gleitlager	 Drehkranzlager	 integriert in Schwenkeinheit	 integriert in Schwenkeinheit
2.8	Schneid- werkzeug	 Rundmesser	 Messer/ Stichel	 breite Klinge	 Plottermesser mit Tiefenbegrenzung
2.9a	Schneid- vorrichtung	 Angetriebenes Messer	 Hebelschneider/ Scherenmechanik	 Tafelschere/ Schlagschere	 geführtes Messer
2.9b	Antrieb Schneid- vorrichtung	 beliebige Linearachse	 Pneumatikzylinder	 Elektrozylinder	

4 Konzeptionierung eines Prepreg-Legers

3. Steuerung					
3.1	Hauptsteuerung	 Raspberry Pi	 Revolution Pi	 SPS - Speicherpro. Steuerung kompakt	 SPS - Speicherpro. Steuerung Leistung
3.2	Motorsteuerung	 Motorcontroller	 Motorcontroller Standalone Lösung	 Motorcontroller via SPS	 Antriebssteuerung
3.3	Bedienung	 Bedienpult	 Touch-Display	 Taster auf Schaltschrank	
3.4	Gehäuse	 Schaltschrank	 Verteilerkasten		
4. Sicherheit					
4.1	Eingriff in Maschine vermeiden	 Lichtgitter	 Lichtschranke Werkzeugkopf	 Einhausung	 Kraftmessung an Motoren
4.2	Sicherheitsüberwachung		 Sicherheitsrelais		
4.3	Sicherheitsabschaltung		 Not-Aus Taster		
5. Gestell					
5.1	Aufnahme Roboter-einheit	 Werkbankgestell	 Alu-Profile	 Bodenverankerung	

4.4.2 Skizzen der Lösungsvarianten

Aus der Lösungsmatrix sind nun vier Varianten entstanden, die hier näher beschrieben werden. Da die vierte Variante lediglich eine Abwandlung der zweiten darstellt, wird diese nicht skizziert betrachtet, eine Erläuterung erfolgt dennoch.

Gelenkroboter

Die erste Variante der Lösungsmatrix beinhaltet einen Gelenkroboter mit Vakuumsauger. Vorgeschnittene Bahnen werden mit Hilfe des Vakuumsaugers von Stapelmagazinen entnommen und auf der vorgewärmten Heizplatte abgelegt. Danach muss mit Hilfe z.B. eines Messers (genau wie beim händischen Ablegen) die Trennfolie gelöst und mit dem Vakuumsauger vom Prepreg entfernt werden.

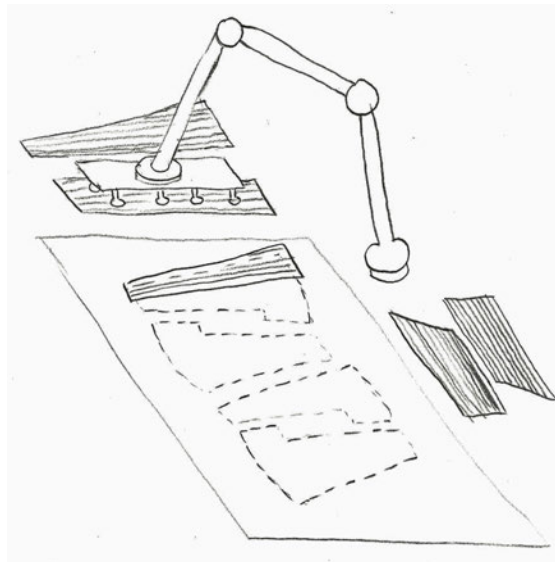


Abbildung 4.6: Handskizze der Lösungsvariante 1: Gelenkroboter

Portalroboter

In der zweiten Variante der Lösungsmatrix wird ein Portalroboter gezeigt. Dieser führt einen drehbaren Werkzeugkopf, an dem sich die Prepreg-Rolle befindet. Über Transportrollen wird das Prepreg geführt, verfahren und auf der Heizplatte abgelegt. Mit einer

langen Klinge wird das Material wie bei einer Schlagschere geschnitten und der Werkzeugkopf kann zur nächsten Bahn weiterfahren. Die Drehbewegung, um den Kopf zwischen der 0°-Lage und der 90°-Lage zu realisieren, geschieht über einen pneumatischen Rotationszylinder. Um den Werkzeugkopf zu rotieren, wird dieser mit pneumatischen Kolbenzylindern angehoben. Somit wird sichergestellt, dass das abgelegte Material nicht beschädigt wird.

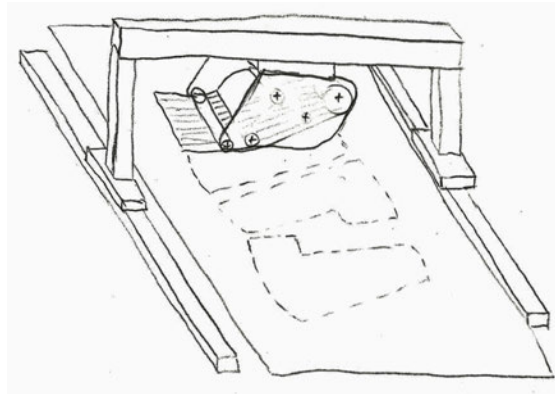


Abbildung 4.7: Handskizze der Lösungsvariante 2: Portalroboter

Pick & Placeroboter

Die dritte Lösungsvariante besteht aus einem Pick & Placeroboter, auch Deltaroboter genannt. Eine Kinematik am Roboterkopf lässt eine Bewegung im Raum realisieren. Da der Antrieb direkt am Kopf angebracht ist, entsteht eine relativ kompakte Bauweise. Der Werkzeugkopf ist ähnlich dem der ersten Lösungsvariante des Gelenkroboters. Der Hauptunterschied besteht in der Baugröße. Hier werden passgenaue Streifen vorgesehen, die jedes Bustape exakt bedecken, ohne große Verschmitze zu erzeugen. Der Vorbereitungsaufwand steigt dadurch. Das Entfernen der Trägerfolie funktioniert genauso wie in der ersten Variante.

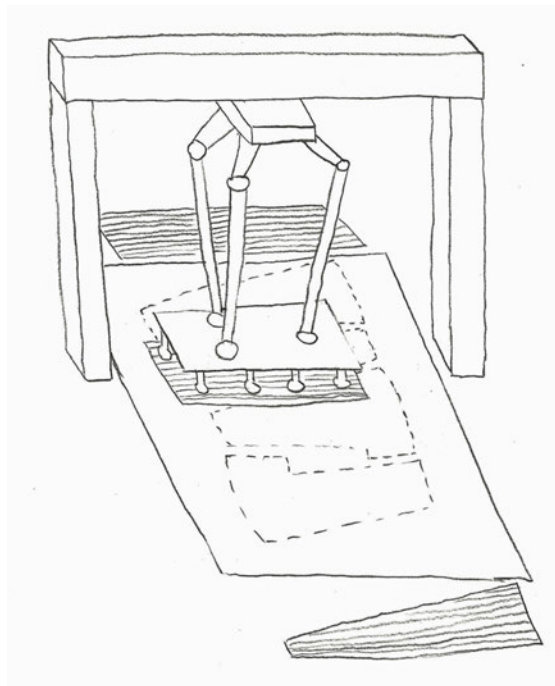


Abbildung 4.8: Handskizze der Lösungsvariante 3: Deltaroboter

Linearroboter

Der Linearroboter als vierte Variante funktioniert prinzipiell wie der Portalroboter. Der Hauptunterschied ist die etwas einfachere Mechanik. Hier wird die Heizplatte in der X-Achse verfahren und die Brücke in der Y-Achse. Der Bauraum wird dadurch jedoch erheblich größer. Weitere Vereinfachungen sind ebenfalls beim Portalroboter anwendbar. So wird durch Spindeln zum Antrieb der Achsen auf Getriebe verzichtet. Ebenfalls wird auf eine komplexe Steuerung verzichtet. Ein wesentlicher Unterschied besteht in der Schneideinheit. Bei dieser Lösung wird ein Plottermesser mit Tiefenbegrenzung verwendet, welches das Prepreg auf der Trägerfolie schneidet, ohne diese mit zu beschädigen. Bei industriellen Robotern im Bereich der automatisierten Prepreg-Ablage kommt dieses System häufig zum Einsatz. Auf Grund der Gefahr, das Trägerpapier ebenfalls zu durchtrennen, wird auf diese Lösung verzichtet. Bei großen Fertigungen können die verarbeitenden Firmen exakte Vorgaben zum Prepreg und zum Trägerpapier machen, da hier allerdings nur geringe Mengen abgenommen werden, ist dies jedoch nicht möglich.

4.4.3 Kriterien

Prozesssicherheit

Zur Realisierung eines Roboters, der ein automatisches Ablegen von Prepreg ermöglicht, ist es zwingend erforderlich, dass das Ergebnis immer der gleichen Qualität entspricht. Das Material darf weder beim Lagern, im Roboter, beim Ablegen noch hinterher beschädigt werden. Die Kohlenstoffasern (Harz nicht ausgehärtet) sind zwar zug-unempfindlich, brechen bei leichtem Druck jedoch sehr schnell. Dies kann gerade dann passieren, wenn das Material zu stark gebogen/ umgelenkt wird. Außerdem kann das Prepreg durch ruckartige Bewegungen, die das Material beim Abbremsen stauchen lassen, brechen. Ein ebener Transport durch vorgeschchnittenes Material (Prepreg + Trägerpapier) verhindert eine solche Gefahr. Eine weitere Möglichkeit bei der Verarbeitung von aufgewickeltem Prepreg ist es, das Material straff zu halten.

Mechanische Genauigkeit

Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die Genauigkeit beim Ablegen. So darf der Spalt zwischen den einzelnen Lagen nur sehr gering (0,2 mm, siehe Anforderungsliste 4.1) sein, um keine Festigkeitsunterschiede in der Ebene zu erzielen. Ein Überlappen der Bahnen wäre ebenfalls ungünstig, da hierdurch die Ebenheit verschlechtert wird. Des Weiteren sollen die drei Lagen jeweils einen Winkel von 90° zueinander aufweisen. Das lässt sich jedoch leicht über eine gesteuerte Ablage erreichen.

Personensicherheit

Da es sich um potenziell gefährliche Bewegungen einer solchen Maschine handelt, müssen jegliche Gefahren für das Bedienpersonal, bzw. sich in der Umgebung der Maschine befindliche Personen, ausgeschlossen werden. Durch eine Kapselung kann dies erreicht werden. Aufwendigere Sicherheitslichtgitter oder Sicherheitslichtschranken sind ebenfalls möglich. Um die Gefahren zu erkennen und die Minimierung dieser zu erreichen, werden sie mit Hilfe einer Gefährdungsbeurteilung nach der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG bewertet.

Realisierungsaufwand

Ein weiterer Punkt, der über die Realisierung eines Roboters entscheidet, ist der Gesamtaufwand, der nötig ist, um eine solche Maschine zu entwickeln, konstruieren, fertigen, programmieren und schließlich in Betrieb zu nehmen. Hiermit ist nicht nur die Komplexität gemeint, sondern auch die Wirtschaftlichkeit.

4.4.4 Lösungsbewertung mit dem Wertigkeitsverfahren

Zur Bewertung der verschiedenen Lösungsansätze wird das Wertigkeitsverfahren (siehe Tabelle 4.3 Wertigkeitsverfahren) verwendet. In einer Lösungsmatrix werden alle Kriterien aufgelistet und diesen sinnvolle Gewichtungen (g_k) zugewiesen, die in der Summe 1 ergeben. Die Lösungsalternativen werden in den Spalten daneben aufgelistet und jeder Einzellösung eine Bewertung (P_i) von 0 bis 4 zugewiesen. Durch die Summierung der Einzellösungsergebnisse $\sum_{n=0}^N (g_k \cdot P_i)$ entsteht eine Gesamtwertung. Die Gesamtlösung mit der besten Bewertung ist dann weiter zu verfolgen.

4.4.5 Beschreibung der favorisierten Lösung

Nach Auswertung der Lösungsvarianten hat sich der Portalroboter als zu favorisierende Lösung herausgestellt. Dieses Grundprinzip wird im Detail beschrieben. Die Konzeptionierungsphase ist damit abgeschlossen und wird durch die Konstruktion im Kapitel 5 »[Konstruktive Ausführung der favorisierten Lösung](#)« fortgeführt.

Tabelle 4.3: Wertigkeitsverfahren

0 = unbefriedigend 1 = noch tragbar 2 = ausreichend 3 = gut 4 = sehr gut	Lösungsbewertung	gehört zu Auftrag: Prepreg-Roboter
--	-------------------------	---

Bewertungskriterien	Gewichtung	Lösungs- alternative		Lösungs- alternative		Lösungs- alternative	
		I		II		III	
	g_k	P_1	$g_k \cdot P_1$	P_2	$g_k \cdot P_2$	P_3	$g_k \cdot P_3$
Ablegequalität, vergleichbar mit händischem Gelege	0,1	3	0,3	4	0,4	3	0,3
Prozesssicherheit hoch	0,15	3	0,45	4	0,6	3	0,45
Mechanische Genauigkeit des Geleges hoch	0,1	3	0,3	3	0,3	3	0,3
Fehleranfälligkeit gering	0,1	3	0,3	3	0,3	3	0,3
Fehlstellen im Prepreg erkennbar/vermeidbar	0,1	4	0,4	3	0,3	4	0,4
Komplexität/ Installationsaufwand gering (Steuerung/ Elektrik)	0,2	1	0,2	3	0,6	2	0,4
Herstellungsaufwand gering	0,1	3	0,3	2	0,2	3	0,3
Montageaufwand gering	0,05	3	0,15	3	0,15	4	0,2
Kompaktheit	0,05	3	0,15	2	0,1	4	0,2
Energieversorgungsvielfalt (Strom/ Druckluft, Vakuum)	0,05	3	0,15	4	0,2	3	0,15

Punktzahlen - Summe	1,00	Sum =	2,7	Sum =	3,15	Sum =	3
Wertigkeit Gesamtlösung		W =	67,50%	W =	78,75%	W =	75,00%
Rangfolge		Rang =	3	Rang =	1	Rang =	2

5 Konstruktive Ausführung der favorisierten Lösung

5.1 Baugruppenunterteilung

Nach Erarbeitung einer favorisierten Lösung geht es an die Umsetzung. Um diese komplexe Aufgabe durchzuführen, wird das Gesamtkonzept in mehrere Baugruppen unterteilt und einige wiederum in weitere Unterbaugruppen. Durch diesen Ansatz werden aus einem komplexen Gesamtsystem viele Teilsysteme generiert, die geschlossen in sich betrachtet werden können. Hierdurch lassen sich die einzelnen Unterbaugruppen fertigen sowie montieren und ihre Funktionsweise unabhängig vom Gesamtsystem ermitteln. Aus den vorherigen Überlegungen werden folgende Teilsysteme bestimmt:

- Portal
 - X-Achse
 - Y-Achse
 - Energietransport (Spannungs-, Daten-, Pneumatikleitungen)/ Energiekette
 - Antrieb (Elektromotor und Getriebe)
- Werkzeugkopf
 - Schneidvorrichtung
 - Dreh- und Schwenkeinheit
 - Ablegeeinheit
- Gestell mit Schaltschrank
- Heizplatte

5.2 Skizze

Nach den Vorüberlegungen zum Aufbau des Roboterportals werden sie nun in einer händischen Skizze zusammengetragen, welche als Hilfestellung beim Modellieren im CAD-System (computer aided design - computergestütztes Konstruieren) und zur Abschätzung von Geometrien und groben Maßen dient.

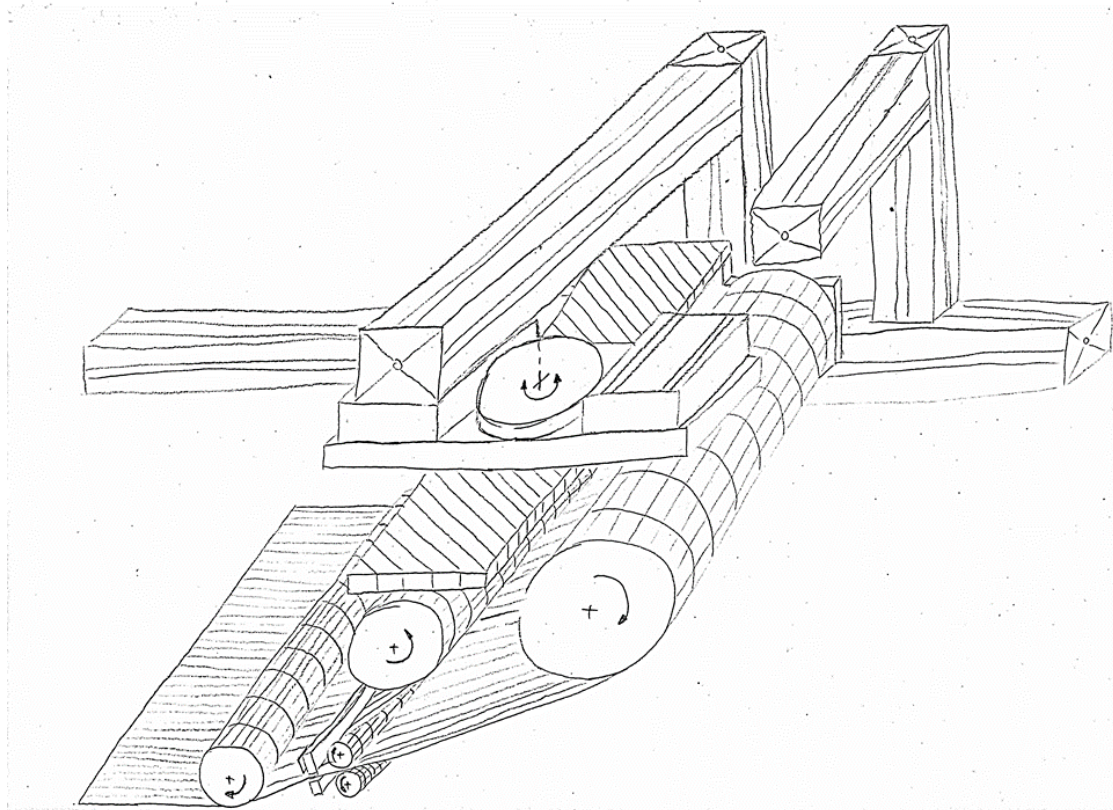


Abbildung 5.1: Handskizze der favorisierten Lösung des Roboterportals

5.3 Umsetzung des Bewegungsapparates

In den nachfolgenden Abschnitten wird die konstruktive Entstehung des Portalroboter erläutert. Aus diesem Grund wird auf den Werkzeugkopf in zwei Iterationen eingegangen. Bei der Darstellung handelt es sich um die zeitliche Abfolge des Entstehungsprozesses. Dadurch sind die Abschnitte [5.4 Erster Entwurf Werkzeugkopf](#) und [5.6 Finales Design](#)

Werkzeugkopf durch den Abschnitt 5.5 Roboterportal unterbrochen. Dem Leser soll hierdurch der Entstehungsprozesses veranschaulicht werden. Mit Hilfe des CAD-Programms Siemens NX wird die Konstruktion realisiert und in der Datenbank Teamcenter, einem PLM-System (Product Lifecycle Management), welches an NX angebunden ist, verwaltet.

5.4 Erster Entwurf Werkzeugkopf

Zur Realisierung der gesamten Maschine wird mit der Konstruktion des Werkzeugkopfes begonnen. Die resultierende Größe, das Gewicht, der Massenschwerpunkt, die Aktuatoren und dessen benötigte Energieversorgung bestimmen maßgebend das Design des Portals. Des Weiteren stellt der Werkzeugkopf nicht nur die Haupteinheit der Gesamtkonstruktion dar, sondern entscheidet maßgebend über die Realisierung des Ablegeprozesses vom Prepreg.

5.4.1 Schneidvorrichtung

Bis auf das Ablängen des Prepregs konnten durch Versuche alle grundlegenden Prinzipien zur Ablage realisiert werden. Aus diesem Grund wird mit der Umsetzung einer Schneideinheit begonnen. Aus der Lösungsmatrix folgt eine Schneidvorrichtung mit Hilfe von Klingen.

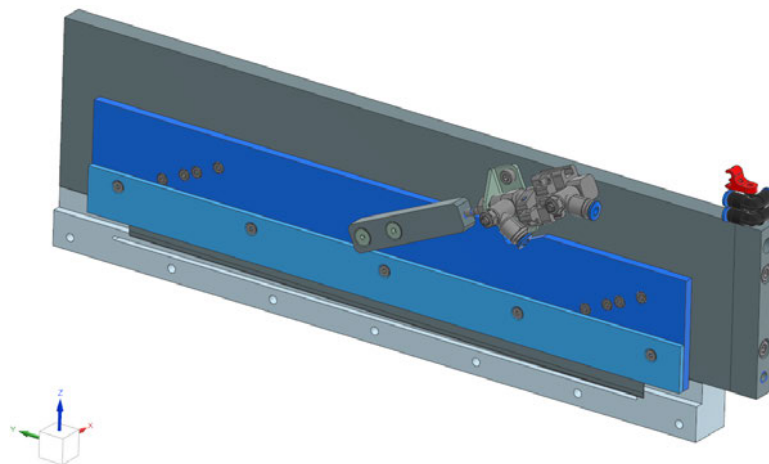


Abbildung 5.2: Schneidvorrichtung

Wie bei einer Stanze soll eine Klinge über die gesamte Breite einen horizontalen Schnitt durchführen. Ein eventuelles Schrägstellen der Klinge zur Schneidachse bewirkt, dass der Schnitt wie bei einem Papierschneidgerät punktuell von einer Seite zur anderen geführt wird. Hierdurch lassen sich die aufzubringenden Kräfte reduzieren. Da kein Messer mit einer Klingenslänge der Prepregbreite von $L \geq 310$ mm gefunden werden konnte, wird der Verfahrweg zum Schneiden künstlich durch eine Diagonalbewegung zur Materialebene verlängert. Ein doppelt wirkender Pneumatikzylinder sorgt für eine schnelle Bewegung. In der Abbildung 5.2 ist die fertige Konstruktion ersichtlich. Das Funktionsprinzip ist in der Abbildung 5.3 dargestellt.

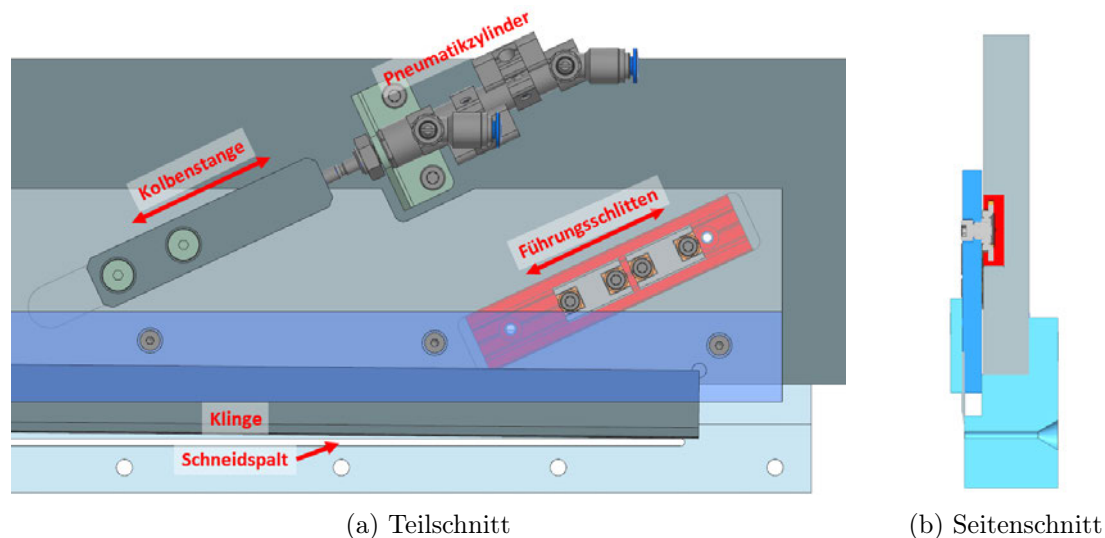


Abbildung 5.3: Schneidvorrichtung schematisch

Nach ersten Versuchen wurde lediglich der Schneidspalt eingestellt und das Spiel der Messerführung mit Hilfe von Präzisionslehrbändern reduziert. Das Prepreg wird durch den Spalt der Schneideinheit geführt. Diese Komponente besteht aus PTFE (Teflon), damit ein Anhaften der Matrix vermieden wird. Das Messer selbst ist eine Glasfaserklinge mit einem speziellen Schliff der Firma MOZART AG. (Siehe [A.5 Glasfaserklinge](#))

5.4.2 Transporteinheit

Aus den entwickelten Grundlagen des Prototypen in Kapitel 4.2 ist bekannt, dass mit Hilfe von industriellen Transportrollen ein Ablegen von Prepreg auf einer Heizplatte realisierbar ist. Hierfür wird eine Transportrolle zur Aufnahme der bereitgestellten Prepreg-Rolle

verwendet - eine zum Andrücken und eine weitere zum Aufwickeln des Trägerpapiers. Um das Ablegen in einen automatisierten Prozess einzubinden, wird ein Antrieb benötigt, der die Trägerschicht zur Fortbewegung des Prepregs fungiert und gleichzeitig das Material auf Spannung hält. In einer Diskussion mit Herrn Dipl.-Ing. Volker Prahl wurde auf ein bereits vorhandenes Antriebskonzept mit Hilfe einer Schleifkupplung zurückgegriffen. Zur Messung von Magnetstrukturen in den HERA-Beschleunigerkomponenten wurde ein auf einem Schlitten befestigter Messkopf in den Hohlraum des Magneten eingeführt. Ein Elektromotor wickelte über eine Schleifkupplung eine Spule auf, an dem der Schlitten verfahren wurde. Durch diesen Mechanismus konnte der Schlitten an jeder beliebigen Stelle angehalten werden, ohne einen größeren Steuerungsaufwand zu betreiben.

Angenommen wird, dass zur Ablage des Prepregs lediglich das Trägerpapier auf Spannung gehalten werden muss und ein Aufwickeln des überschüssigen Trägerpapiers nötig ist, was durch einen Elektromotor realisiert wird. Eine Andrückrolle presst das Prepreg auf eine Heizplatte, wodurch es an dieser kleben bleibt. Beim Verfahren des Portals wird nun an den CFK-Fasern gezogen und die Prepreg-Rolle abgewickelt. Eine an der Rollenaufnahme angeflanschte Schleifkupplung sorgt für die Straffung des Materials, sodass dieses gleichmäßig transportiert wird. Weitere Rollen sorgen für die Ausrichtung des Materials. Wichtigster Bestandteil ist die Trennrolle, die vor der Schneideinheit montiert ist und das Prepreg von der Trägerschicht trennt. Ein erster Entwurf sieht wie folgt aus:

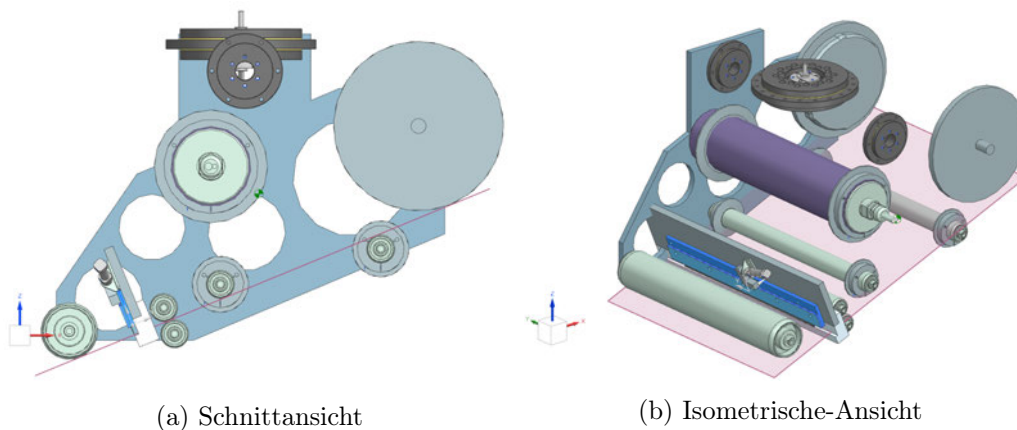


Abbildung 5.4: Erster Entwurf Werkzeugkopf

5.5 Roboterportal

5.5.1 Auswahl der Portalkomponenten

Nach Ausmodellierung eines groben Werkzeugkopf-Konzeptes kann mit dem Roboterportal begonnen werden. Beim DESY finden in diversen Bereichen Aluminium-Stranggussprofile der Firma RK Rose+Krieger GmbH (R+K) Anwendung und stellen mit einem am DESY-Lager verfügbaren Sortiment eine Standardisierung dar.




Abbildung 5.5: R+K Flanschverbindung [26]

Aus diesen Profilen lassen sich mit Hilfe von Flanschverbindern (siehe Abbildung 5.5) auf einfache Weise diverse Konstruktionen wie z.B. Gestelle, Regale, Reinräume, Montagevorrichtungen usw. realisieren. Des Weiteren verfügt R+K ebenfalls über Linearachsen und Antriebslösungen, wodurch die Vorauswahl für die Lineareinheiten dann auf R+K fiel. Mit Hilfe der Anforderungsliste wurde Herr Peters von der Firma RK Antriebs- und Handhabungs-Technik GmbH kontaktiert, der das DESY im Auftrag von R+K betreut. Durch die Angaben aus der Anforderungsliste und einiger Annahmen (z.B. Gewicht des Werkzeugkopfes) wurde das Auslegungstool von R+K ausgefüllt (siehe Abbildung 5.6 und

A.2) und ein erstes Ergebnis zusammen mit Herrn Peters betrachtet. Da die treibenden Kosten nicht die Länge der Lineareinheiten bestimmt, sondern überwiegend in der Steuerung liegt, wurde das Portal größer dimensioniert, um flexibel für weitere Anwendungen zu bleiben. So entstand ein Fahrweg in X-Richtung von $X = 2050 \text{ mm}$ und in der Y-Achse $Y = 1500 \text{ mm}$ (benötigt $Y = 1026 \text{ mm}$). Um die Kosten gering zu halten und flexibler in der Konstruktion zu bleiben, wurde auf eine Übergabe an die RK Antriebs- und Handhabungs- Technik GmbH verzichtet und das Design in Eigenleistung erstellt. Anschließend entstand dann die Konstruktion des Portals, bestehend aus einem Rahmen zur Aufnahme der beiden Zahnriemenachsen (X-Achsen) und der Quertraverse zur Implementierung der Y-Achse durch ein weiteres Gestell. Auf diesem Gestell wird eine Zahnriemenachse und eine dazu parallel laufende Linearachse montiert, um Torsionskräfte des angeflanschten Werkzeugkopfes auszugleichen, das durch die Gewichtsverlagerung beim Auf-/ Abwickeln des Prepregs von der Materialaufnahmerolle zur Förderrolle, durch Dreh- und Schwenkbewegungen des Werkzeugkopfes und das resultierende Moment beim

Andrücken des Prepregs auf der Heizplatte entsteht. Die Aluminiumprofile lassen sich mit Flanschleisten stirnseitig verbinden, siehe Abbildung 5.5. Flansche zur Montage der Lineareinheiten auf dem R+K-Profil und die Anbindung zwischen X- und Y-Achse wurden eigenständig konstruiert und gefertigt.

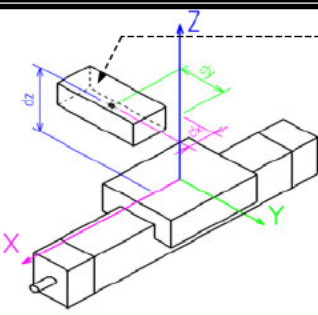
Lineareinheiten Auswahl : Ergebnisse



Kunde : Desy Herr Ahrens		Datum : 24.05.2022	
Projekt : X-Achse Verlegekopf			

	Phase ->	Beschleunigung	Linear	Verzögerung	Total
Zyklus	Weg	50,1 mm	1899,8 mm	50,1 mm	2000 mm
	Zeit	0,334 s	6,33 s	0,334 s	7,00 s
	☑ Beschleunigung = Verzögerung				
Anwendungsdaten	Geschwindigkeit	0,300 m/s			Pausenzeit : 0 s
	Beschleunigung	0,90 m/s ²		0,90 m/s ²	Genauigkeit : ± 0,1 mm

Kräfte



Masse : 100 kg

dx : mm

dy : 0 mm

dz : mm

Ausrichtung

Vertikal (Schwerkraft nach X)

Horizontal (Schwerkraft nach Y)

Horizontal (Schwerkraft nach Z)

MT

	Schwerkraft	Dynamisch	Andere	Total
Fx	0 N	92 N	N	92 N
Fy	0 N		N	0 N
Fz	1026,3 N		N	1.026 N
Mx	0 Nm		Nm	0 Nm
My	0 Nm	0 Nm	Nm	0 Nm
Mz	0 Nm	0 Nm	Nm	0 Nm

Sonstige mitbewegte Massen : kg

Abbildung 5.6: Auslegung Lineareinheit: X-Achse

5.5.2 Auswahl der Steuerungs- und Antriebseinheit

Da sich nun alle wichtigen mechanischen Eigenschaften aus den Linearachsen ergeben, kann mit der Umsetzung des Antriebes begonnen werden. Die Firma R+K bietet zwar hierzu Komplettlösungen, doch wurde auf diese Komponenten verzichtet, da die spätere Maschine mit einer Speicherprogrammierbaren Steuerung - SPS von Siemens betrieben werden soll. Da das Wissen im Steuerungsbereich grundlegend beim Autor vorhanden ist, wurden weitere Lösungsansätze außen vor gelassen. Andere Lösungen können z.B. die Verwendung des auf dem Campus verbreiteten zweiten SPS-Herstellers Beckhoff Automation GmbH & Co. KG sein. Auch eine Insellösung z.B. von R+K, dessen Verwendung bei dieser Maschine auf Grund ihrer vielen Sensorik und Befehlstaster als ungeeignet angesehen wird, wäre eine Alternativlösung. Um das Steuerungskonzept einfach zu halten, fiel die Entscheidung zur Realisierung des Antriebes auf die Verwendung von Motorsteuerung und Elektromotoren von Siemens.

Steuerung

Mit den mechanischen Eigenschaften aus dem Portal und der Grundidee, einen bekannten Steuerungstyp zu verwenden, wurde die Firma Siemens kontaktiert. Mit Herrn Brauer, einem zugewiesenen Mitarbeiter der Siemens AG, entsteht ein komplettes Steuerungspaket auf Grundlage der Mechanik und dem Wunsch, einen einfachen Steuerungstypen, der S7-1200 SPS zu verwenden. Zur Hilfenahme stand das »TIA Selection Tool« von Siemens zur Verfügung. Hier werden alle wichtigen mechanischen Eigenschaften eingegeben. Mit Hilfe des Tools und dem Fachwissen von Herrn Brauer wurde ein Steuerungskonzept auf Basis der SPS S7-1200 und den Motorcontrollern V90 realisiert. Die Auslegung hierzu befindet sich im Anhang unter [A.3](#). Aus den Planungen ist ebenfalls ein neues Antriebskonzept für den Transport der Trägerfolie hervorgegangen und werden nun mit dem gleichen Motor (+ Motorbremse) und Motorsteuerung angetrieben. Dadurch vereinheitlicht sich die Steuerung und reduziert den Entwicklungsaufwand. Somit haben alle drei Antriebsstränge die gleichen Motoren sowie den gleichen Motorcontroller.

Getriebe

Die Kraftübertragung zwischen Elektromotoren und Linearachsen erfolgt über Getriebe. Jene sind nötig, um das erforderliche Drehmoment zum Verfahren der X- und Y-Achse

aufzubringen. Eine grobe Vorauswahl, welche die mechanischen Eigenschaften der Antriebssysteme berücksichtigt, wurde von Siemens getroffen. Verwendet wird ein Übersetzungsverhältnis von $i = 1 : 20$ für beide Antriebe. Trotz der geringeren aufzubringenden Drehmomente in der Y-Achse wird der Einfachheit halber das gleiche Getriebe verwendet. In Absprache mit Siemens und R+K wurde auf Getriebe der Firma Neugart GmbH zurückgegriffen. Dabei hilft das Auslegungsportal von Neugart, ein passendes Getriebe zu ermitteln. Lediglich die Bauform der Vorauswahl wurde geändert, sodass nun platzsparende Winkelgetriebe zum Einsatz kommen. Im Anhang A.4 ist das verwendete Getriebe abgebildet.

Motorflansch

Die Flansche zur Aufnahme der Getriebe an die X- und Y-Linearachsen wurden an die Firma R+K vergeben. So konnte zügig die Bestellung des gesamten Portals erfolgen und eine in sich geschlossene fertigbare Einheit realisiert werden.

Energiekette

Um die Energieversorgung des Werkzeugkopfes sowie der Lineareinheiten zu realisieren, werden diverse Steuerungs- und Energieleitungen zwischen Schaltschrank und Aktuatoren (z.B. Elektromotor, Pneumatikzylindern) benötigt. Da die Leitungen während der Portalbewegungen geführt werden müssen, bieten sich hierfür Energieketten an. Energieketten dienen zur Aufnahme von Leitungen, um lineare oder rotatorische Bewegungen zu realisieren. Da nicht alle Leitungen dafür geeignet sind, dauerhaft solchen Bewegungen standzuhalten, müssen »schleppfähige« Leitungen verwendet werden. Sie haben z.B. durch eine feinere Wicklung der Adern eine deutlich flexiblere Formbarkeit. Des Weiteren sind die Mantelmaterialien modifiziert, sodass unter der dauerhaften Formänderung eine höhere Lebenserwartung erreicht wird. Um eine Auswahl zu realisieren, sind alle Leitungen zusammengefasst worden und in die Bewegungsformen unterteilt.

- E-Kette für die Y-Achse: Pneumatik und Steuerleitung für Ventilinsel, Datenleitung für Endlagen der Pneumatikzylinder im Werkzeugkopf, Elektromotor Werkzeugkopf (Encoder- und Spannungsversorgung, Motorbremse)

- E-Kette für die X-Achse: alle Leitungen der Energiekette der Y-Achse plus Encoder- und Spannungsversorgung des Elektromotor Y-Achse, Sicherheitslichtschranke, Endlagenschalter

Die Bewegungsform zwischen Werkzeugkopf sowie Portal werden nicht über E-Ketten realisiert, sondern über Schlaufen, die ein Verdrehen um 90° realisieren. Zur einfachen Montage der Leitungen sind Steckanschlüsse zwischen Werkzeugkopf und Aufnahme installiert. Mit den Bezeichnungen der Motorleitungen von Siemens ist zusammen mit der Firma igus GmbH eine Auswahl zu allen benötigten »schleppfähigen« Leitungen und den beiden Energieketten getroffen worden.

5.5.3 Konstruktion des Portals

Nach Auswahl aller zu bestellenden Komponenten externer Firmen kann mit der eigentlichen Konstruktion begonnen werden. Dazu sind alle Bauteile der zu bestellenden Komponenten in einer Baugruppe im CAD-System zusammengefasst. Auf Grund der extrem langen Lieferzeitangaben zu einzelnen Komponenten der Firmen Siemens AG und Neugart GmbH wurden die Komponenten der Portaleinheit direkt bestellt noch bevor alle Details ausmodelliert waren. Erschwerend kommen die weltweiten unterbrochenen Lieferketten auf Grund der Pandemie-Auswirkungen hinzu, die eine Planbarkeit erheblich einschränken. Wegen der modularen Konstruktion kann die Implementierung des Werkzeugkopfes unkompliziert angepasst werden. Es besteht die Möglichkeit, weitere Iterationen des Werkzeugkopfes vorzunehmen, ohne dass das Konzept des XY-Portals davon betroffen ist. Um das Portal abzuschließen, erfolgen noch Anpassungen der zu fertigen Montagekomponenten. Das fertige Ergebnis ist der Abbildung 5.7 zu entnehmen.

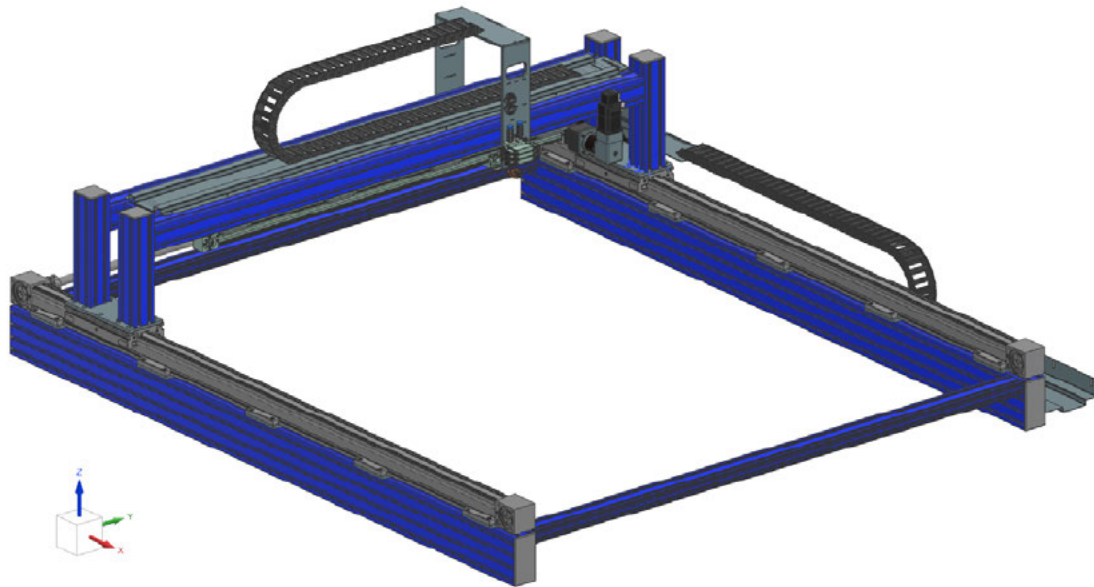


Abbildung 5.7: Roboter-Portal aus Linearachsen mit Energieketten

5.5.4 Komponenten des Portals

Folgend im Überblick die wichtigsten Komponenten zum Verbinden der R+K-Profile sowie der Kabelführungen. Die Ausrichtung der Komponenten wird anhand von technischen Zeichnungen im Abschnitt [6.1 Von der Zeichnung zur Fertigung](#) erläutert.

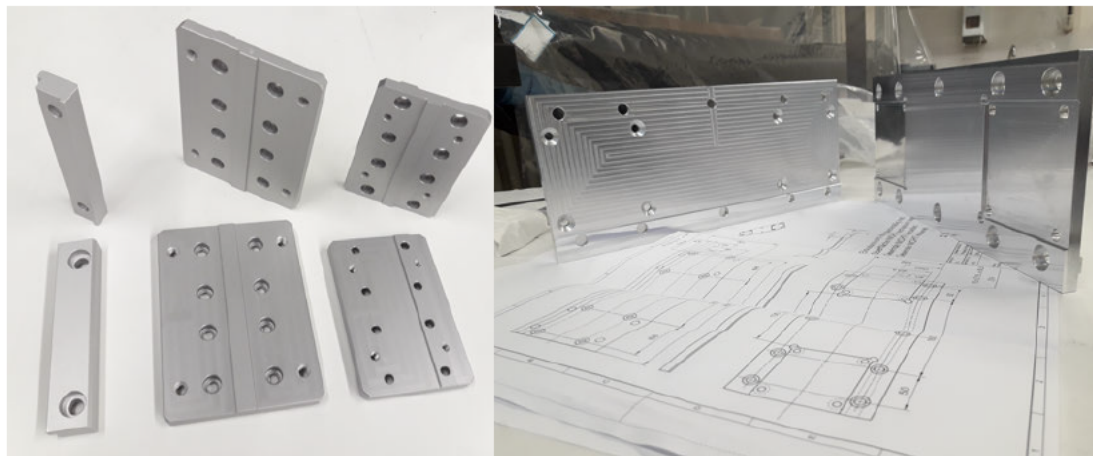


Abbildung 5.8: Gefertigte Verbindungen zur Aufnahme der Linearachsen und R+K-Profile



Abbildung 5.9: Bleche für Kabelführung und E-Ketten

5.6 Finales Design Werkzeugkopf

Nach einem ersten Entwurf des Werkzeugkopfes (siehe [5.4 Erster Entwurf Werkzeugkopf](#)) und des daraus resultierenden XY-Portals (siehe [5.5 Roboterportal](#)) kann nun ein finales Design des Werkzeugkopfes erstellt werden. Treibende Kraft für die Modifikationen sind die Integration der Antriebseinheit vom Trägerpapier, welches mit Hilfe des gleichen Servomotortyps wie für die X- und Y-Zahnriemenachsen geschieht. Hierfür musste eine neue Firma zum Antrieb der Aufwickel-Achse gefunden werden. Auf der Suche nach einer Antriebslösung mit Hilfe eines Riementriebes wurde die Firma KRAUS Betriebsausstattung und Fördertechnik GmbH kontaktiert. Mit Hilfe von Herrn Rutar wurden alle Transportrollen individuell angepasst. Weitere Optimierungen wurden in der Dreh- und Schwenkeinheit vorgenommen. Unter anderem lässt sich die gesamte Einheit an die Schlitten der Y-Achse mit wenigen Handgriffen montieren. Außerdem konnte der Werkzeugkopf durch eine Neuordnung der Transportrollen kompakter gestaltet werden. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Unterbaugruppen erläutert. Die fertige Gesamtkonstruktion ist in der [Abbildung 5.10](#) zu sehen. Die parallellaufenden Schlitten der Zahnriemenachse sowie der Linearachse (Drehmomentstütze) werden durch einen Bügel

aus drei Aluminiumplatten verbunden. Der Bügel dient zusätzlich zur Übertragung der Energie- und Steuerleitungen aus der E-Kette zum Werkzeugkopf und der Ventilinsel.

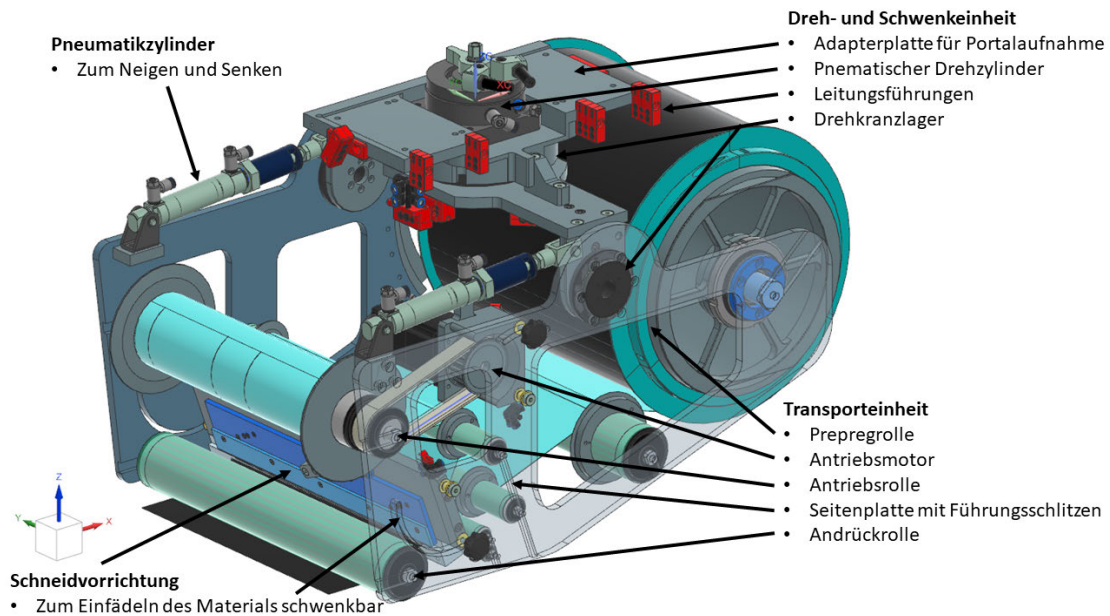


Abbildung 5.10: Werkzeugkopf komplett

5.6.1 Dreh- und Schwenkeinheit

Die Anbindung des Werkzeugkopfes an das Portal wird durch die Dreh- und Schwenkeinheit realisiert. Bestehend aus zwei Rotationsachsen lässt sich der Werkzeugkopf um die horizontale Achse um ca. $\alpha = 6^\circ$ sowie um die vertikale Achse um genau $\gamma = 90^\circ$ drehen. Die Führung wird durch Drehkranz-Gleitlager der Firma igus GmbH realisiert. Kompakte Einheiten ermöglichen eine platzsparende Einbindung.

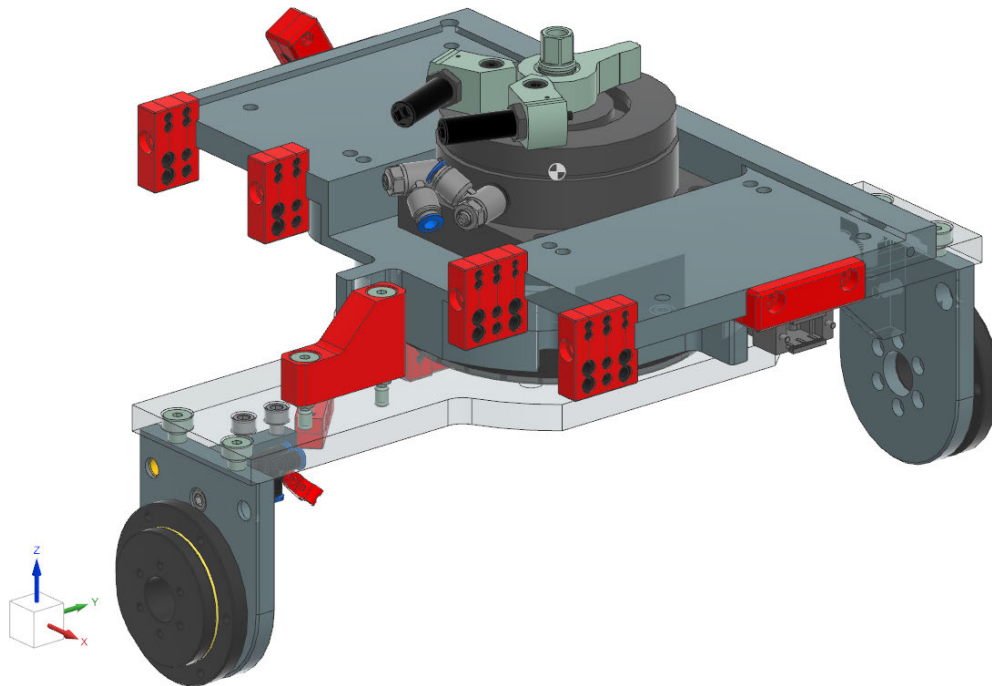


Abbildung 5.11: Dreh- und Schwenkeinheit

Pneumatik

Mit Hilfe einer Ventilinsel werden die Pneumatikaktuatoren der Dreh- und Schwenkbewegung und des Messers angesteuert. Bei den Ventilen handelt es sich um bistabile 3/2-Wegeventile, die nach dem Ansteuern in ihrer Lage verweilen bis ein neuer Schaltimpuls durch die SPS ausgegeben wird. Das Neigen um die horizontale Achse (entweder X- oder Y-Achse) dient zum An- und Absetzen des Werkzeugkopfes. Die Bewegung erfolgt durch zwei Pneumatik Kolbenstangenzylinder. Diese sind zwischen der Schwenkeinheit und der Transporteinheit montiert. Beim Ausfahren der Kolbenstangen wird die Andrückrolle an die Heizplatte gedrückt, sodass das Prepreg beim Ablegen straff gehalten wird und an der Oberfläche der Heizplatte anhaftet. Beim Einfahren der Zylinder wird der Werkzeugkopf angehoben, sodass Dreh- und Fahrtbewegungen möglich sind. Das Messer wird auf gleiche Weise bewegt. Die Drehbewegung geschieht mit Hilfe eines rotatorischen Pneumatikzylinders, dessen Weg durch Anschläge an der Aufnahmeplatte begrenzt wird. Durch Drosselventile wird der Druck im Zylinder langsam aufgebaut, sodass sich eine sanfte

Bewegung einstellt. Am Auslass befinden sich ebenfalls Drossel-Rückschlagventile, wodurch sich die Luft im gegenüberliegenden Zylindervolumen komprimiert und für eine langsamere aber kraftvolle Bewegung sorgt. Genauso verhält es sich bei einer Luftpumpe wenn man einen Finger auf den Auslass hält. Durch das Drosseln der Abluft muss eine höhere Kraft aufgewendet werden und die Bewegung verlangsamt sich. In der Abbildung 5.12 sind die rotatorisch bewegten Komponenten türkis eingefärbt.

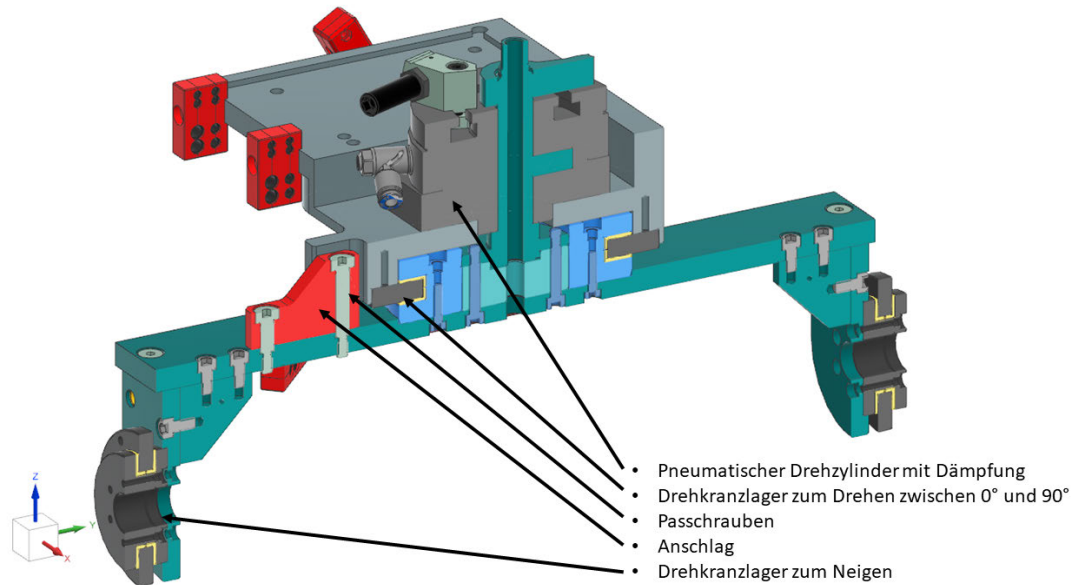


Abbildung 5.12: Dreh- und Schwenkeinheit: Schnittansicht

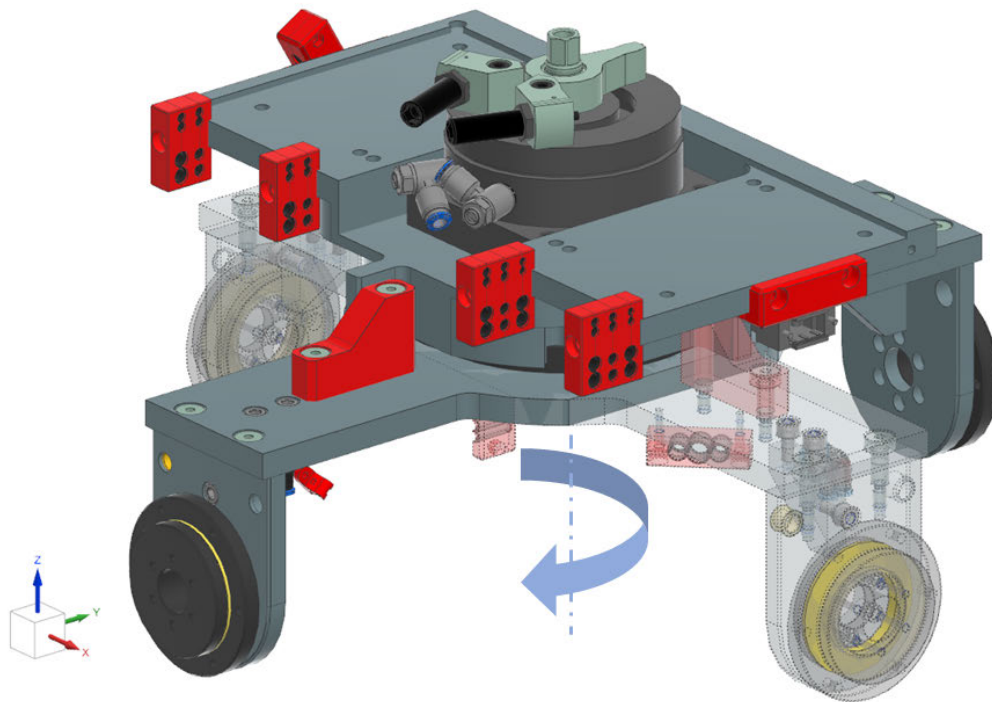


Abbildung 5.13: Dreh- und Schwenkeinheit: Position $0^\circ + 90^\circ$

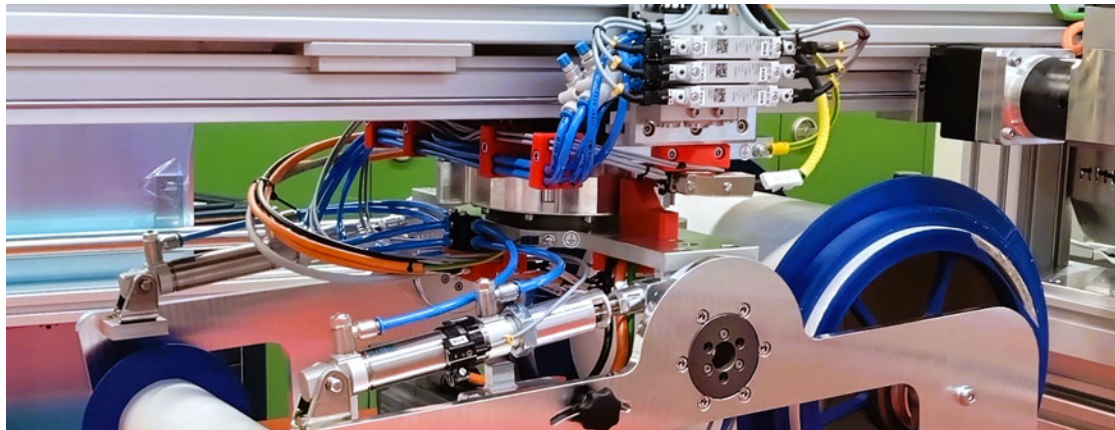


Abbildung 5.14: Kabelführung

5.6.2 Transporteinheit

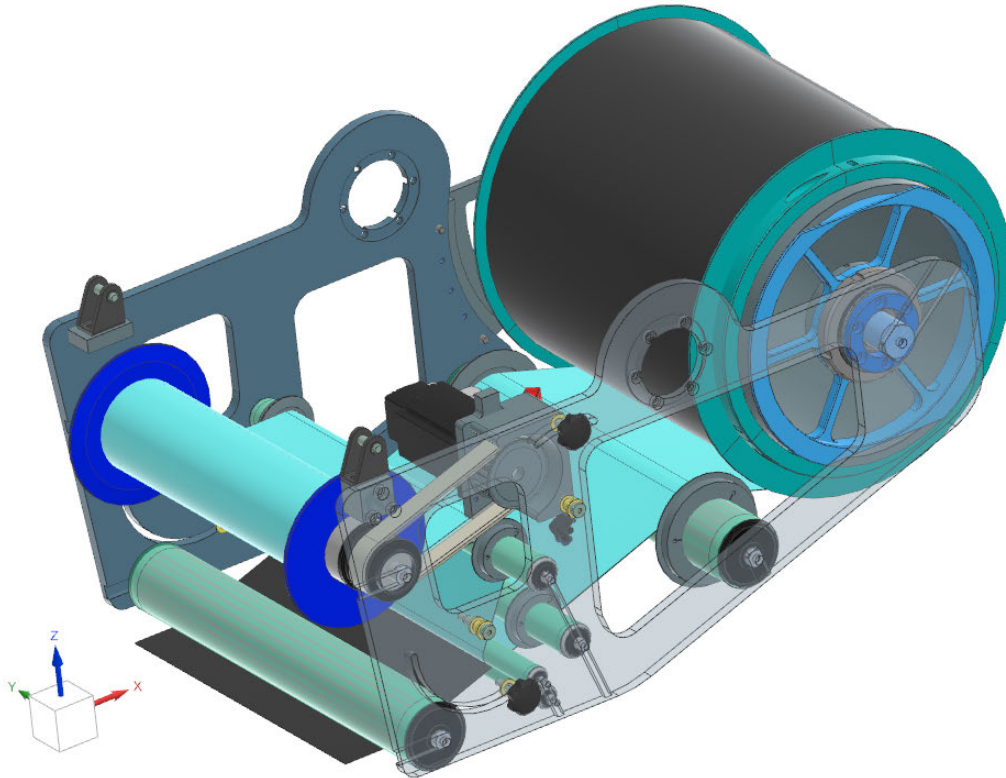


Abbildung 5.15: Transporteinheit, vordere Platte durchscheinend

Das Ablegen des Prepregs auf der beheizten Ablegeplatte erfolgt mit Hilfe der Ablegeeinheit. Sie besteht aus der Materiallagerrolle, der Andrückrolle, einer motorisch angetriebenen Aufwickelrolle sowie mehreren Führungsrollen. Das Prepreg haftet an einer Trägerfolie, an dem durch die Aufwickelrolle gezogen wird. Hierdurch wird das Prepreg bis zur Trennrolle mitgezogen, sodass sich das Prepreg und die Trägerfolie hier trennen. Durch den geringen Biegeradius löst sich das Prepreg und läuft tangential durch die Schneideinheit bis zur Andrückrolle, an der es auf die Heizplatte gepresst wird. Durch eine Rutschkupplung an der Materialrolle wird die Trennfolie mit Prepreg auf Spannung gehalten. Somit entsteht eine gleichmäßige Bewegung und die Verformungen vom Prepreg werden gering gehalten, welche sonst zu Rissen führen könnte. Der Servomotor treibt die Aufwickelrolle mit einer minimal höheren Umfangsgeschwindigkeit an als die

Fortbewegung des Portals. In den Einstellungen des Servomotors wird das Drehmoment begrenzt, sodass das Prepreg ständig straff gehalten wird, aber nicht reißen kann. Durch Seitenführungen wird die Trägerfolie auf einer parallelen Bahn zur Portalachse geführt. Die seitlichen Platten führen die Rollen. Durch Führungsschlitze in den Seitenplatten (siehe Abbildung 5.10) wird die Lage dieser bestimmt, wodurch eine hohe Lagetoleranz der Achsen zueinander realisiert wird.

5.7 Gestell

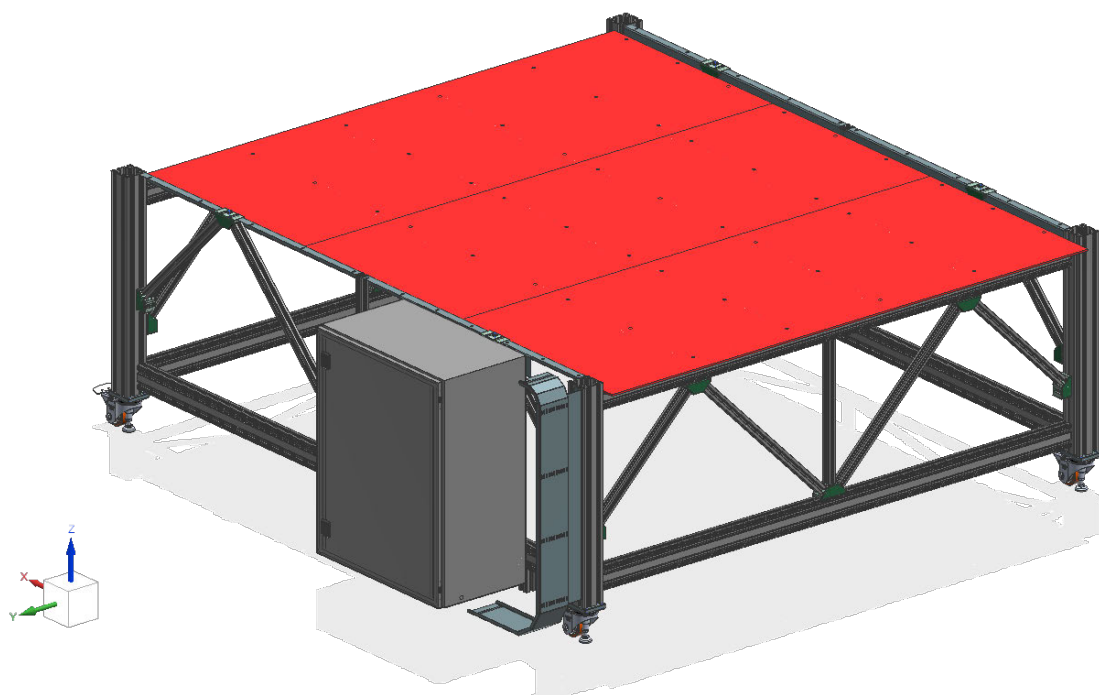


Abbildung 5.16: Untergestell

Um das Portal und die Heizplatte aufzunehmen und die Gesamtkonstruktion als eine unabhängige Maschine zu realisieren, wird ein Gestell benötigt. Es besteht aus R+K-Profilen, die sich über Flanschleistensätze an das Portal anbinden lassen. Hebe-Lenkrollen lassen die Maschine flexibel im Raum anordnen. Versteifungsstreben bringen mehr Steifigkeit in das Gestell und der Neuausrichtungsaufwand nach dem Verfahren der Maschine somit reduziert wird. Der Schaltschrank und die pneumatische Wartungseinheit sind ebenfalls mit integriert.

5.8 Personensicherheit

Um die Maschine in Betrieb nehmen zu können, ist sie nach den Sicherheitsaspekten der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG zu gestalten. In einer Gefährdungsbeurteilung werden alle möglichen Gefahren aufgelistet und durch eventuelle Maßnahmen so verringert, dass deren Auswirkungen und Häufigkeit auf Menschen akzeptabel sind. So sorgen die roten Platten (siehe Abb. 5.16) z.B. für einen geschlossenen Arbeitsbereich, sodass keine Körperteile von unten in den Ablegeprozess eingreifen können. Des Weiteren wird eine Sicherheitslichtschranke samt der zugehörigen Steuerung verwendet, um die Maschine beim Eingreifen einer Person in den Arbeitsbereich sicher abzuschalten. Zum Sicheren Abschalten sind Not-Aus und Halt-Taster eingebunden, die an mehreren Stellen der Maschine sowie am Bedienpult angebracht sind. Eine abschließende Abnahme der erfolgten Maßnahmen steht noch aus.

5.9 Steuerung und Antrieb

Parallel zur Konstruktion wurde die Steuerung entwickelt. Diese umfasst den Schaltschrank, das Bedienpult, die Aktuatoren (Elektromotoren, Pneumatikzylinder) sowie diverse Schaltelemente (Reedkontakte der Pneumatikzylinder, Endlagenschalter, Not-Aus-Taster, Not-Halt-Taster, Lichtschranken). Torsten Külper, ebenfalls in der ATLAS-Gruppe tätig, hat nach meinen Vorgaben der Steuerung (SPS und Motorcontroller) einen Schaltplan erstellt und die gesamte Verdrahtung inkl. Bestellungen und Schaltschrankbau durchgeführt. Hierzu gehört die Realisierung nach VDE-Richtlinien inkl. Funktionstests, Anpassungen und Dokumentation. Der Kern der Steuerung ist die SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung), welche nach dem EVA-Prinzip (Eingabe, Verarbeitung, Ausgabe) arbeitet. Das heißt, Befehle werden z.B. durch das Bedienfeld oder die Sensoren an die Steuerung gemeldet. Diese verarbeitet die Informationen und gibt, falls nötig, Befehle an die Motorcontroller, die LED's auf dem Bedienpult oder/und der Ventilinsel aus. Hierfür stehen der SPS digitale Ein- und Ausgänge (DI - digital input / DO - digital output) zur Verfügung. Beim Betätigen eines Tasters auf dem Bedienpult wird ein 24V-Signal auf einen Eingang durchgeschaltet. Die SPS realisiert das Signal und schaltet z.B. einen 24V-Ausgang, der wiederum über ein Koppelrelais einen Eingang am Pneumatikventil schaltet. Des Weiteren verfügt die SPS über Analog-Eingänge, wovon einer zur Überwachung der Temperatur auf der Heizplatte verwendet wird. Der Datenaustausch zwischen SPS und Motorcontroller erfolgt über eine Ethernet-Verbindung. Die

5 Konstruktive Ausführung der favorisierten Lösung

SPS gibt lediglich die Bewegungsbefehle an die Motorcontroller weiter, die mit Hilfe von Absolutwert-Encodern den Regelkreis der Motoren verarbeitet. Somit lässt sich mit einer einfachen Steuerung ein komplexer Vorgang abarbeiten.

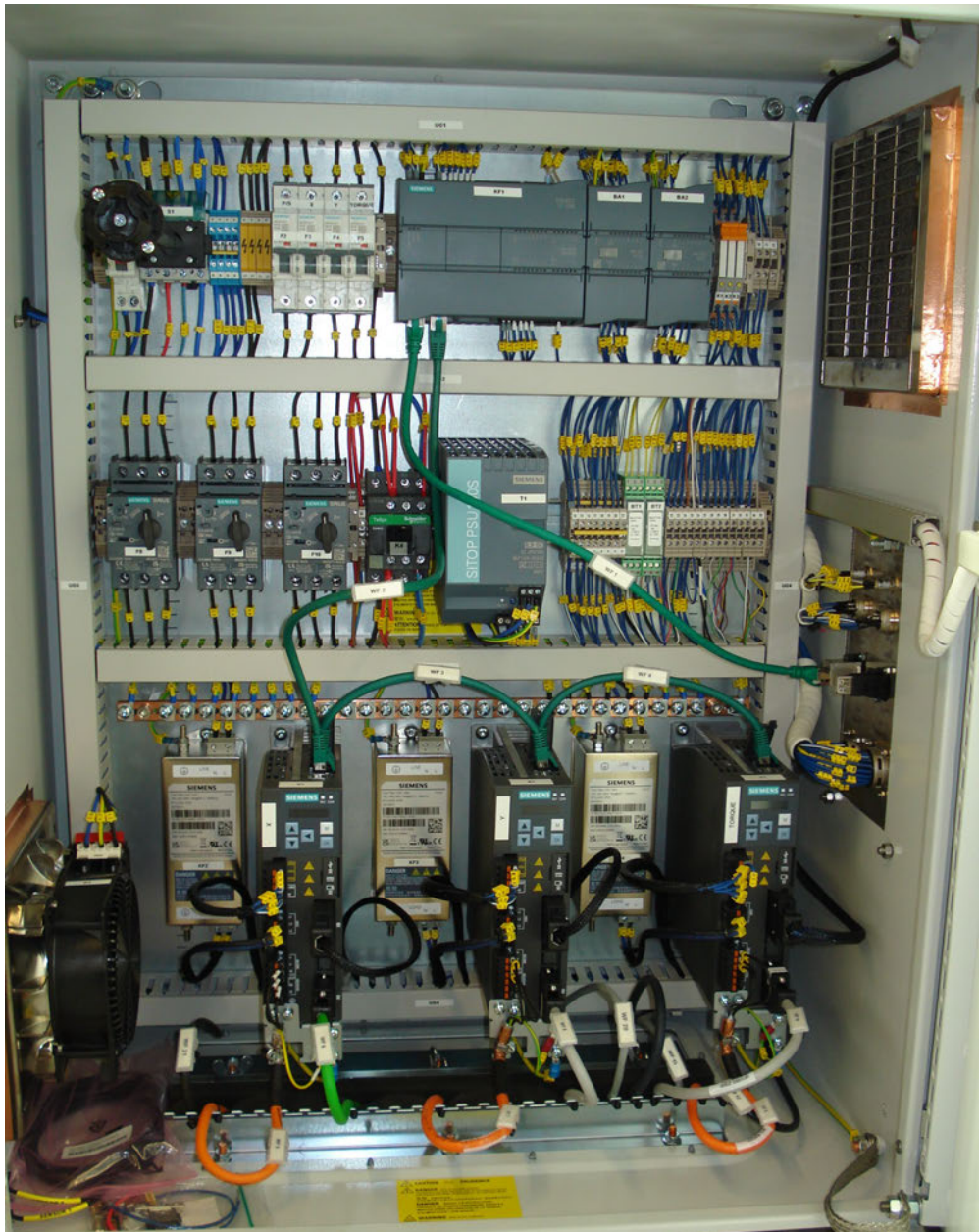


Abbildung 5.17: Schaltschrank

Bedienpult

Das Bedienpult (siehe Abbildung 5.18) dient der Maschinensteuerung. In einem Automatik-Betrieb wird der Ablegeprozess automatisiert abgearbeitet und kann jederzeit unterbrochen oder auch abgebrochen werden. In dem Hand-Betrieb lassen sich für Funktionstests alle Verfahrensbewegungen realisieren, sodass die Parameter für die Motorcontroller angepasst werden können oder eine Einrichtung vorgenommen werden kann. Auch um den Nullpunkt zu setzen, ist vorher ein manuelles Verfahren bis zum Nullpunkt notwendig. Dem Nutzer werden mit Hilfe von farbig hinterlegten Tastern die erlaubten/ möglichen Bewegungen angezeigt. Beim Ausführen einer Bewegung wird diese durch Blinken optisch hervorgehoben.



Abbildung 5.18: Bedienpult

Heizplatte

Das Design sowie die Auslegung der Heizplatte inkl. benötigter Komponenten wurde von Oliver Skura, ebenfalls aus der ATLAS-Gruppe, umgesetzt. Die Realisierung der Steuerung mittels Temperaturregelgerät erfolgte durch Torsten Külper.

5.10 Gesamtkonstruktion

Nach Abschluss aller Unterbaugruppen ergibt sich die Gesamtkonstruktion des Prepreg-Roboter:

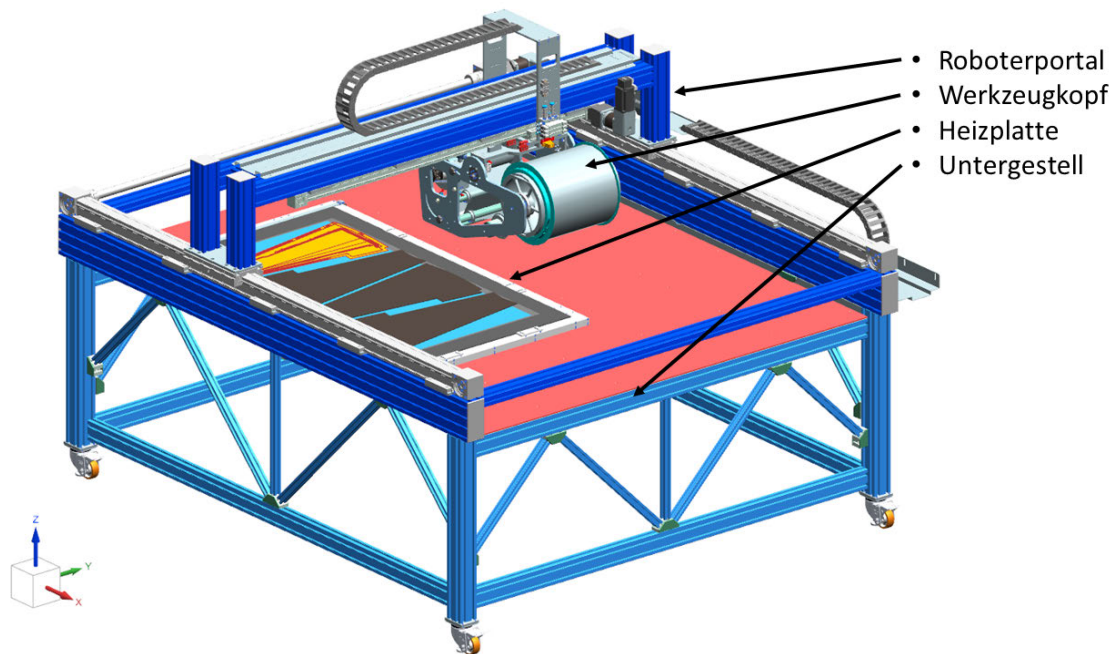


Abbildung 5.19: Gesamtbaugruppe

6 Realisierung der Konstruktion

In diesem Kapitel werden die Schritte beschrieben, die nach der Konstruktion erforderlich sind, um zur fertigen Maschine zu kommen sowie einen Überblick der wichtigsten Maschinenkomponenten zu geben.

6.1 Von der Zeichnung zur Fertigung

Nachdem die Modellierung der Baugruppen mit den Unterkomponenten abgeschlossen ist, müssen sie mechanisch umgesetzt werden. Dazu gehört neben der Erstellung von technischen Zeichnungen für die Fertigung auch die Bestellung von Halbzeugen sowie Norm- und Kaufteile. In einem Stadium, in dem nur noch mit geringen Anpassungen in der Konstruktion zu rechnen ist, wird die Bestellung aller extern benötigten Komponenten ausgelöst. Hierdurch wird das Risiko eingegangen, dass Komponenten nicht auf Anhieb ihre Funktion erfüllen und angepasst werden müssen. Die erhebliche Zeitersparnis von mehreren Monaten überwiegt bei weitem dieses Risiko. In diesem Projekt hat sich diese Annahme bestätigt und es konnten Prozesse, wie die Bestellung von Halbzeugen und Komponenten, die Zeichnungserstellung, die Fertigung sowie die Montage und Verdrahtung parallel erfolgen. Die Unterteilung der Gesamtmaschine in Unterbaugruppen trägt erheblich dazu bei, dass die parallele Abarbeitung möglich ist und diese Teilbaugruppen in sich geschlossen umgesetzt werden können.

6.1.1 Bedeutung der Zeichnungserstellung zur Erfüllung der Maschinengenauigkeit

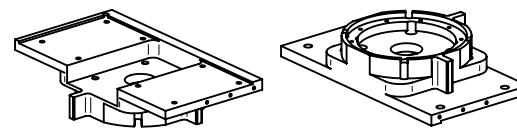
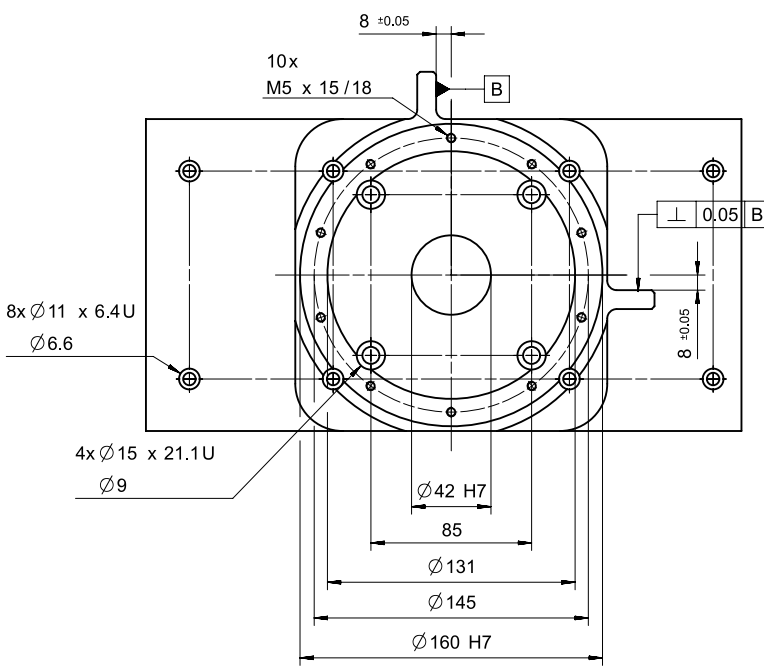
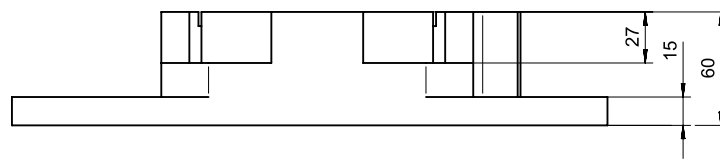
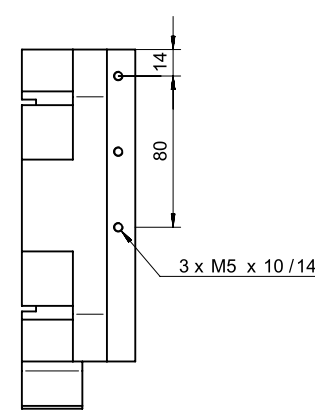
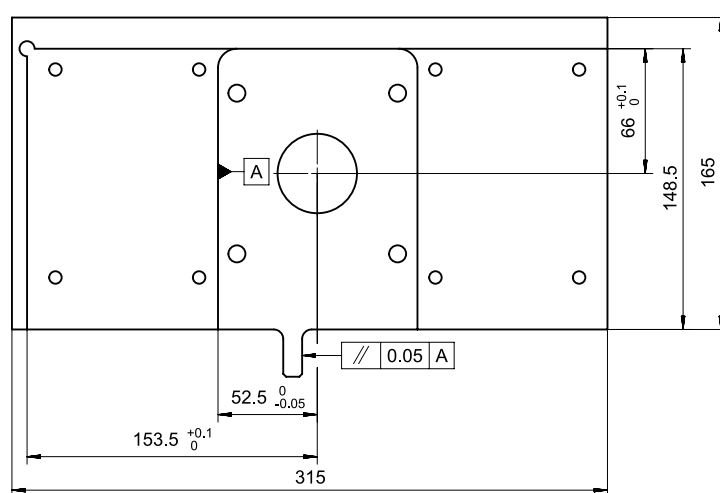
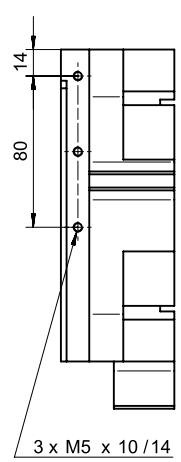
Um die mechanische Genauigkeit zur Ablage des Prepregs zu erreichen, müssen alle Komponenten, die für die Form- und Positionsvorgabe verwendet werden, spezifische Form- und Lagetoleranzen aufweisen. Diese Vorgaben werden dem Fertigungspersonal durch

technische Zeichnungen mitgeteilt. Diese Zeichnungen enthalten alle wichtigen Informationen, um die benötigte Genauigkeit der Form- und Lagetoleranzen abzubilden. Das zuvor konstruierte 3D-Modell aus der CAD-Datei wird in ein CAD/CAM-Programm (CAM - Computer Aided Manufacturing) eingelesen und durch die fertige Person so programmiert, dass geeignete Werkzeuge und Maschinenparameter die gewünschten Toleranzen erfüllen.

Anhand der Aufnahme des Werkzeugkopfes ([Technische Zeichnung: Adapterring_Rotation](#)) sollen die Vorgaben der Zeichnung erläutert werden. Dabei werden alle Angaben in der Zeichnung als Toleranzwerte dargestellt und nicht als Absolutwerte. Das heißt, dass ein Maß immer zwischen zwei Werten liegen darf. Durch diese Angaben werden die Funktionen des Bauteils repräsentiert. Alle Bauteilformen, die keinen großen Einfluss auf Funktionen haben, unterliegen den Allgemeintoleranzen. So sind hier z.B. die Bauteilkanten nicht näher spezifiziert und ausreichend genau angegeben. Alle Geometrien, die Funktionen erfüllen müssen, werden mit Toleranzen versehen.

Das Bauteil ist aus der Mitte funktionsgerecht bemaßt. Ausschlaggebend bei der Adapterplatte ist die Ausrichtung zwischen Werkzeugkopf und Linearachse. Dies wird durch die Seitenkanten der flachen Tasche auf der Oberseite erreicht. Die Schlitten der beiden Y-Linearachsen liegen an dieser Tasche an und geben somit die Winkelgenauigkeit zwischen Portal und abzulegendem Prepreg vor. Der schwenkbare Werkzeugkopf ist über einen Drehkranz an der Unterseite der Adapterplatte montiert. Auf der Oberseite befindet sich der pneumatische Rotationszylinder. Die axiale Ausrichtung (Koaxialität) des Werkzeugkopfes sowie des Antriebes zur Adapterplatte erreicht man, indem die Toleranzen in der Adapterplatte so gering gewählt werden, dass diese auf einer «idealen» Achse liegen. Die Winkelgenauigkeit in der 0°-Lage und 90°-Lage werden durch zwei Anschläge realisiert. Hier wird die Winkeltoleranz verwendet. Der Bezug B (0°-Anschlag) gibt die Abhängigkeit an, zu dem die Fläche (90°-Anschlag) in einem 90°-Winkel stehen muss und zwar in einem Toleranzfeld von 0,05 mm. Das heißt, dass die tolerierte Flächen zwischen zwei gedachten «idealen» parallelen Ebenen liegen muss, die einen Abstand von 0,05 mm aufweisen.

Nachfolgend sind komplexere Bauteile zur Realisierung des Werkzeugkopfes sowie der Kabelführung dargestellt:



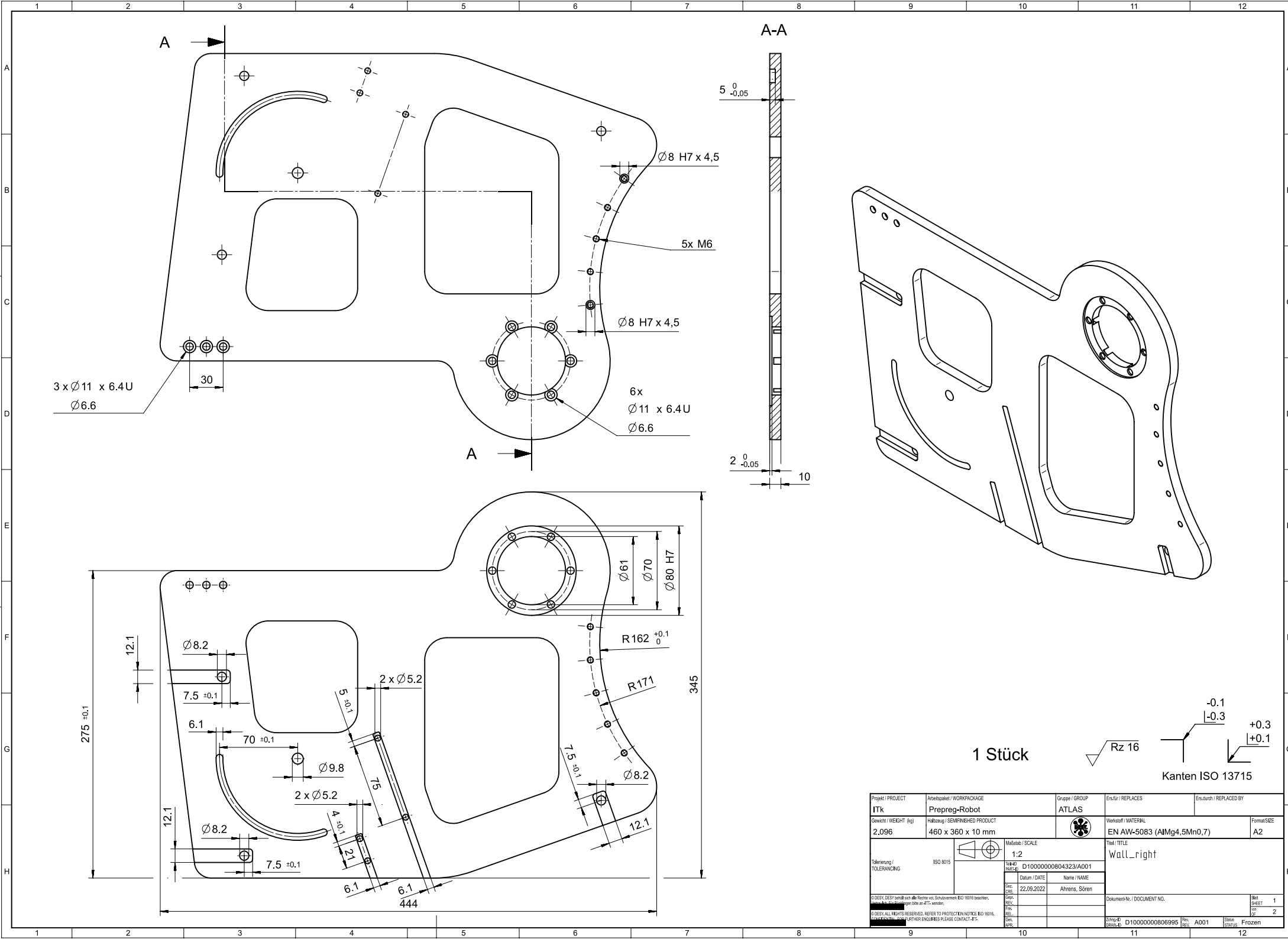
1 Stück

Rz 6.3

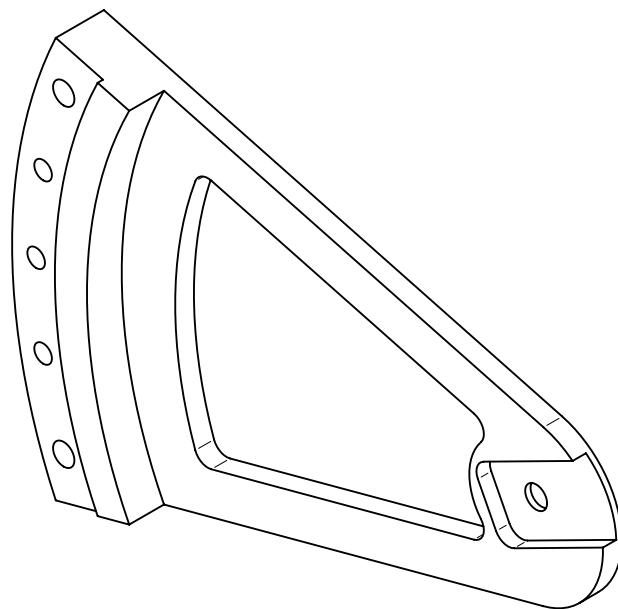
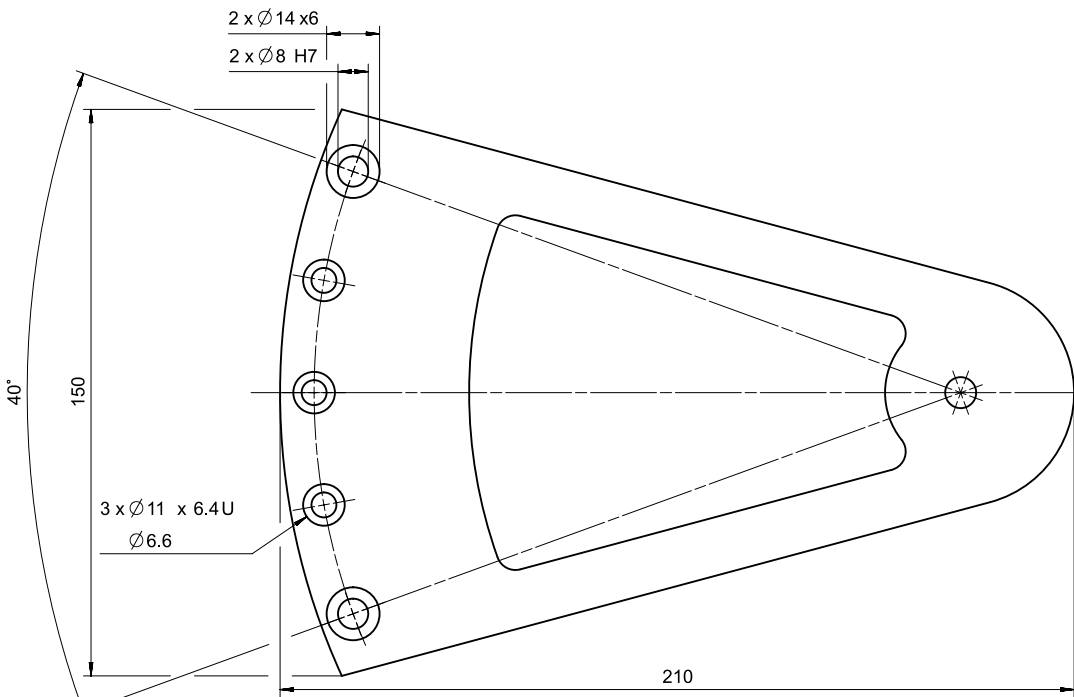
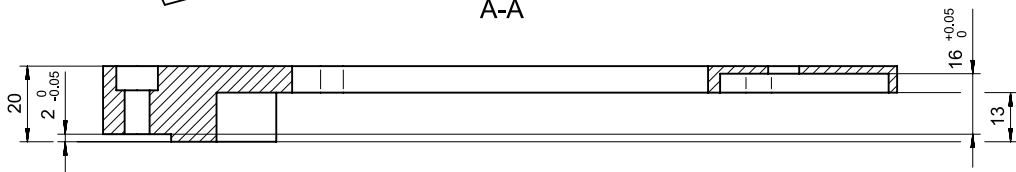
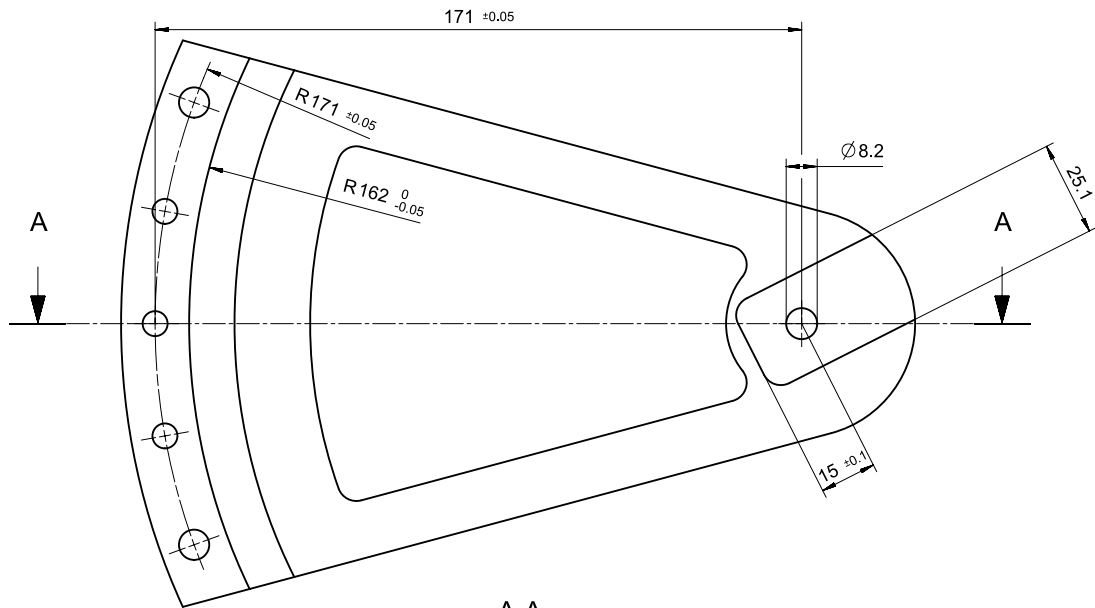
Kanten ISO 13715

Surface finish: $\sqrt{-0.1}$, $\sqrt{-0.3}$, $\sqrt{+0.3}$, $\sqrt{+0.1}$

Projekt / PROJECT ITk	Arbeitspaket / WORKPACKAGE Prepreg-Robot	Gruppe / GROUP ATLAS	Erst./für / REPLACES	Erst./durch / REPLACED BY
Gewicht / WEIGHT (kg) 2,658	Halbzeug / SEMIFINISHED PRODUCT 317x192x60mm		Werkstoff / MATERIAL EN AW-5083 (AlMg4.5Mn0.7)	Format/SIZE A2
Erläuterung / TOLERANCING ISO 8015		Maßstab / SCALE 1:2	Titel / TITLE Adaptring_Rotation	
© DESY, DESY behält sich alle Rechte vor. Schutzvermerk R50 16016 beachten. Alle Rechte vorbehalten. Weiterverbreitung und Kopieren ist ohne schriftliche Genehmigung der DESY. © DESY. ALL RIGHTS RESERVED. REFER TO PROTECTION NOTICE R50 16016. REPRODUCTION AND FURTHER PUBLICATIONS PLEASE CONTACT: DESY.		Zeichn.-Nr. / Drawing No.: D10000000719194/A002 Datum / DATE: 29.08.2022 Name / NAME: Ahrens, Sören	Dokument-Nr. / DOCUMENT NO.: Sheet / Blatt: 1 of 1 Status: Frozen	

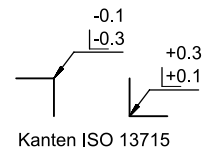


Project / PROJECT	Arbeitspaket / WORKPACKAGE	Gruppe / GROUP	Erst für / REPLACES	Erst durch / REPLACED BY
ITk	Prepreg-Robot	ATLAS		
Gewicht / WEIGHT (kg)	Halbzug / SEMIFINISHED PRODUCT		Werkstoff / MATERIAL	Format/SIZE
2.096	460 x 360 x 10 mm		EN AW-5083 (AlMg4.5Mn0.7)	A2
Skizzenurteilung / TOLERANCING	ISO 8015	Maßstab / SCALE	Titel / TITLE	
		1:2	Wall_right	
© DESY, DESY behält sich alle Rechte vor. Schutzvermerk R50 16116 beachten. Alle Rechte vorbehalten. Bitte an ATI wenden.		Dokument-Nr. / DOCUMENT NO.		Blatt / SHEET
© DESY, ALL RIGHTS RESERVED. REFER TO PROTECTION NOTICE R50 16116. ALL RIGHTS RESERVED. PLEASE CONTACT ATI.		D10000000804323/A001		1
		Datum / DATE	Name / NAME	2
		22.09.2022	Ahrens, Sören	
		Dokument-Nr. / DOCUMENT NO.		Status
		D10000000806995		Frozen
		Rev. / Rev.	A001	

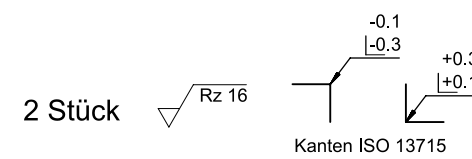
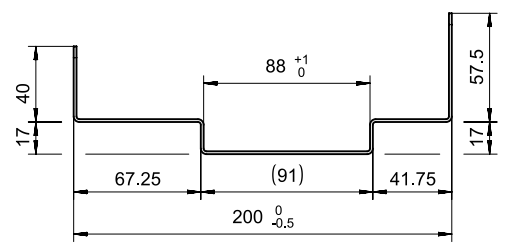
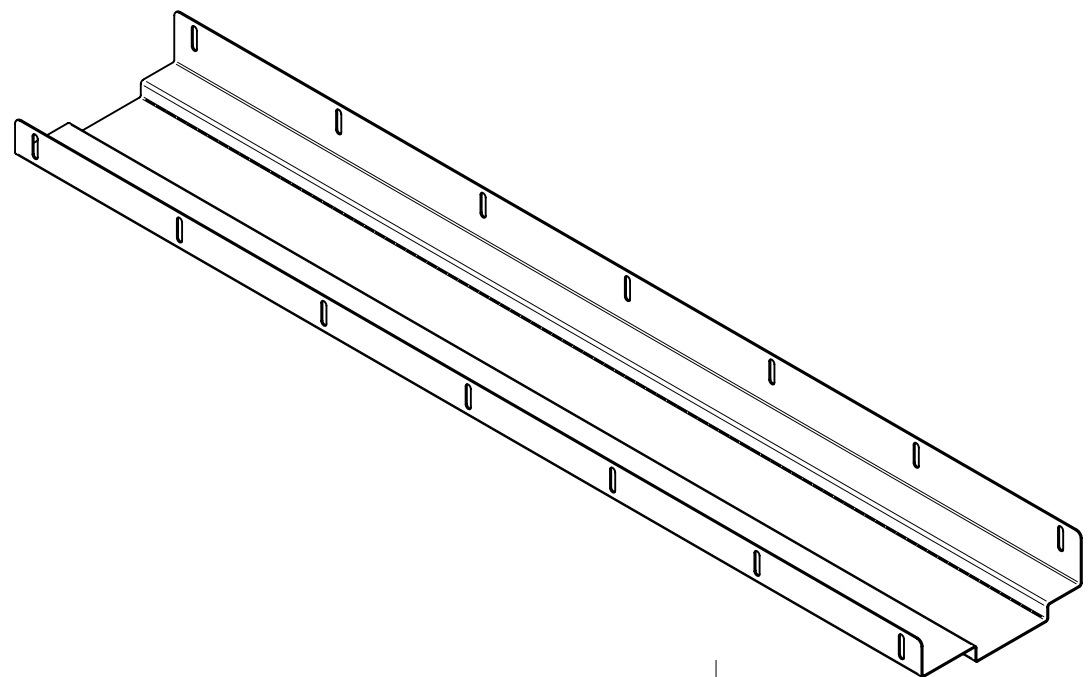
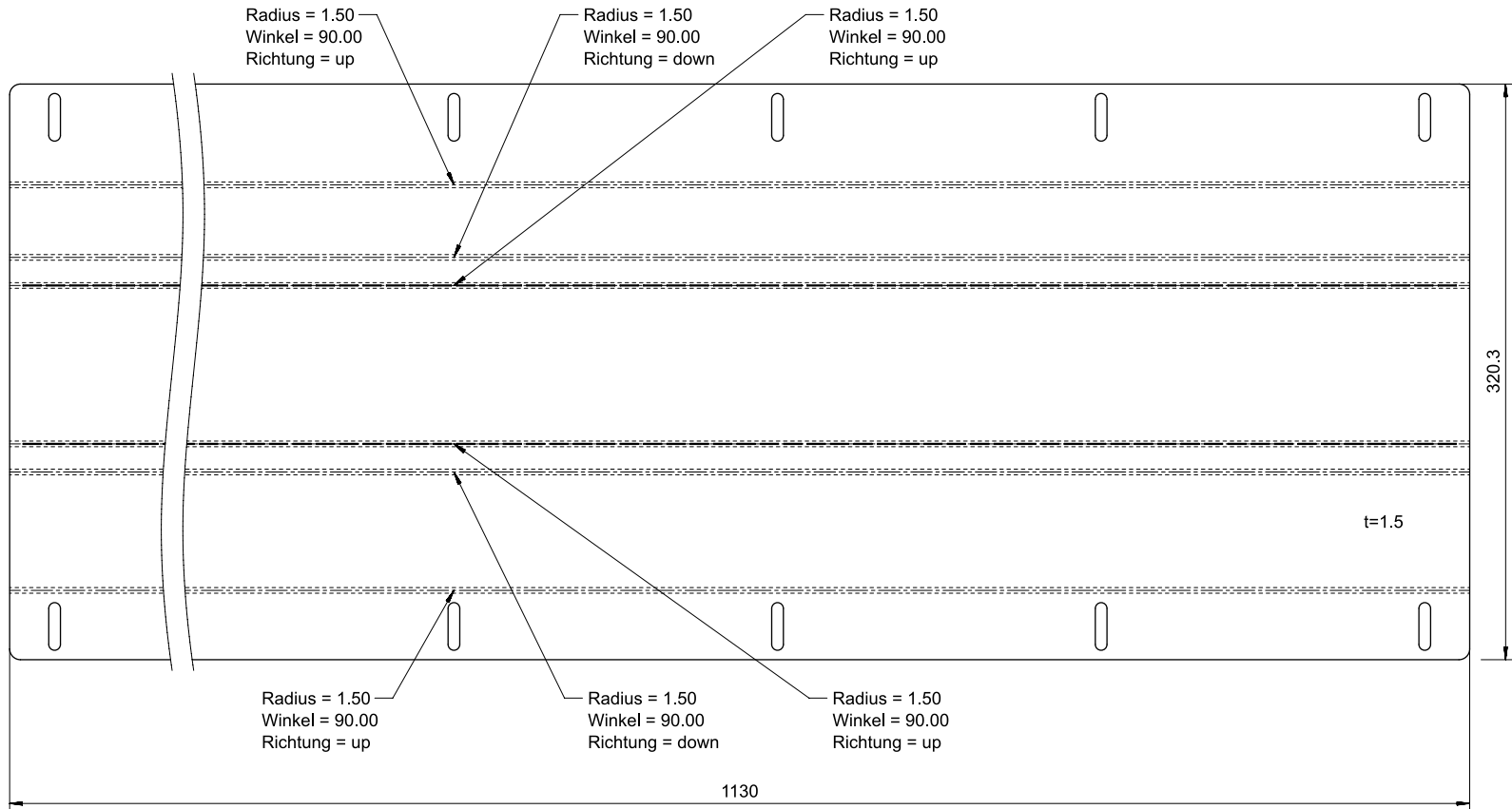


1 Stück

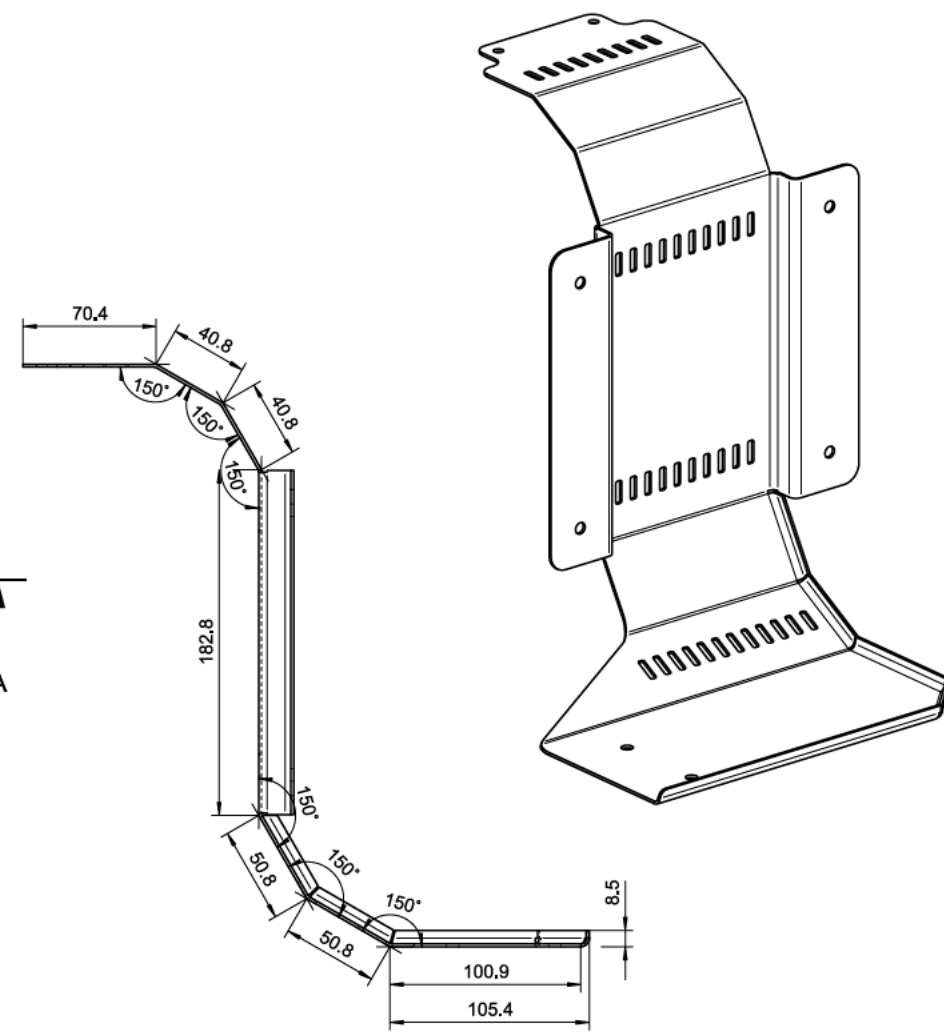
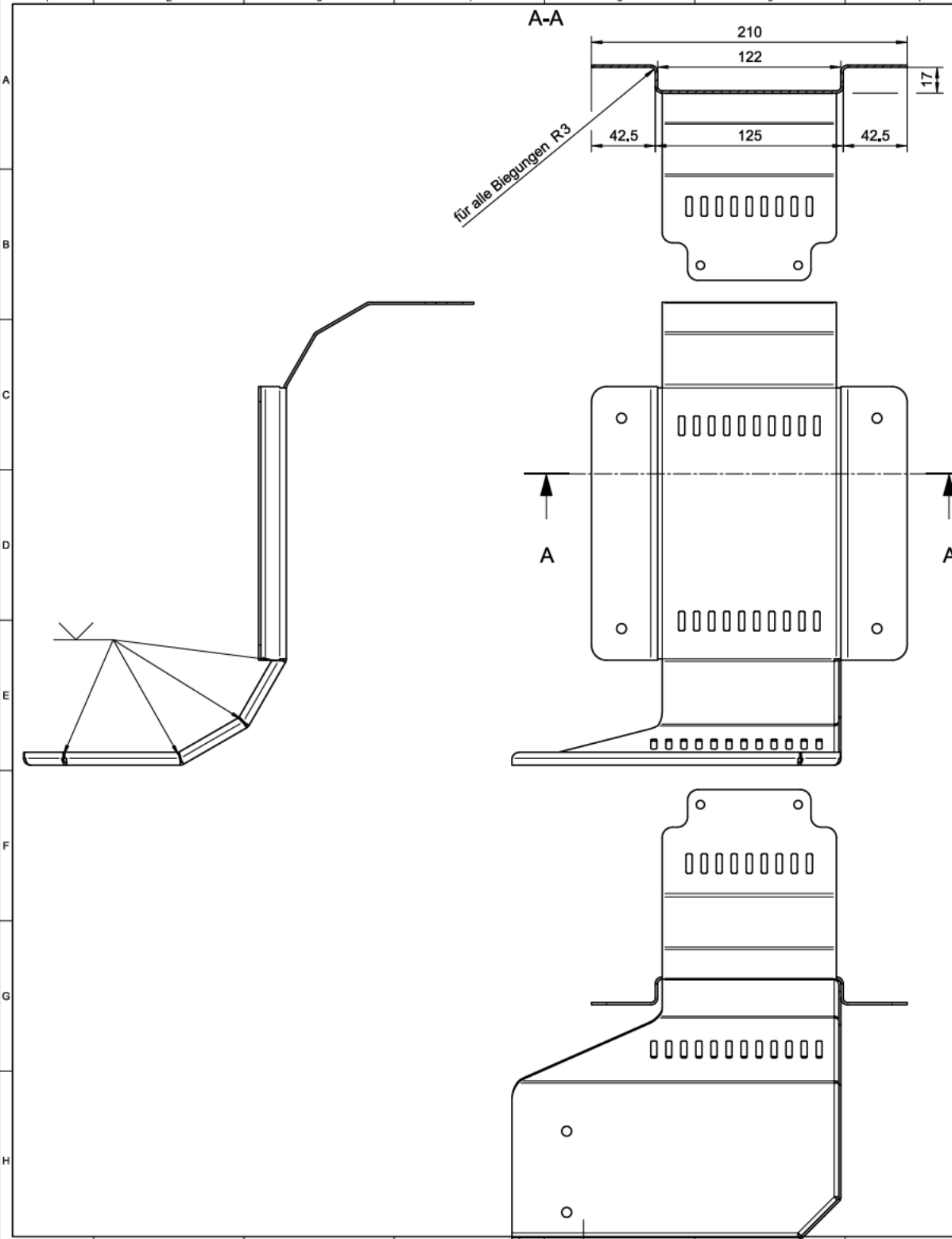
Rz 16



Projekt / PROJECT	Arbeitspaket / WORKPACKAGE	Gruppe / GROUP	Erst./ für / REPLACES	Erst./ durch / REPLACED BY												
ITk	Prepreg-Robot	ATLAS														
Gewicht / WEIGHT (kg)	Halbzug / SEMIFINISHED PRODUCT		Werkstoff / MATERIAL	Format/SIZE												
0,345	220 x 160 x 20 mm		EN AW-5083 (AlMg4.5Mn0.7)	A2												
Tolerierung / TOLERANCING	ISO 8015	Maßstab / SCALE 1:1	Titel / TITLE													
			Wall_right_Extension													
© DESY, DESY behält sich alle Rechte vor. Schutzvermerk R50 16016 beachten. Bitte bei allen Änderungen bitte an-ATI- wenden.		<table border="1"> <tr> <th>Rev. / Rev.</th> <th>Datum / DATE</th> <th>Name / NAME</th> </tr> <tr> <td>001</td> <td>22.09.2022</td> <td>Ahrens, Sören</td> </tr> </table>	Rev. / Rev.	Datum / DATE	Name / NAME	001	22.09.2022	Ahrens, Sören	<table border="1"> <tr> <th>Dokument-Nr. / DOCUMENT NO.</th> <th>Blatt / SHEET</th> </tr> <tr> <td>D10000000804534/A001</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td></td> <td>2</td> </tr> </table>		Dokument-Nr. / DOCUMENT NO.	Blatt / SHEET	D10000000804534/A001	1		2
Rev. / Rev.	Datum / DATE	Name / NAME														
001	22.09.2022	Ahrens, Sören														
Dokument-Nr. / DOCUMENT NO.	Blatt / SHEET															
D10000000804534/A001	1															
	2															
© DESY. ALL RIGHTS RESERVED. REFER TO PROTECTION NOTICE R50 16016. https://www.desy.de/infocenter/infocenter_enquiries.php PLEASE CONTACT: ATI.		<table border="1"> <tr> <th>Rev. / Rev.</th> <th>Datum / DATE</th> <th>Name / NAME</th> </tr> <tr> <td>001</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	Rev. / Rev.	Datum / DATE	Name / NAME	001			<table border="1"> <tr> <th>Struktur-Nr. / STRUCTURE NO.</th> <th>Rev. / Rev.</th> <th>Status</th> </tr> <tr> <td>D10000000807041</td> <td>A001</td> <td>Frozen</td> </tr> </table>		Struktur-Nr. / STRUCTURE NO.	Rev. / Rev.	Status	D10000000807041	A001	Frozen
Rev. / Rev.	Datum / DATE	Name / NAME														
001																
Struktur-Nr. / STRUCTURE NO.	Rev. / Rev.	Status														
D10000000807041	A001	Frozen														



Projekt / PROJECT	Arbeitspaket / WORKPACKAGE	Gruppe / GROUP	Erst./ für / REPLACES	Erst./ durch / REPLACED BY
ITk	Prepreg-Robot	ATLAS		
Gewicht / WEIGHT (kg)	Halbzug / SEMIFINISHED PRODUCT		Werkstoff / MATERIAL	Format/SHEET
4.255	1300 x 400 x 1.5mm		1.4301 (X4CrNi18-10)	A2
Erklärung / TOLERANCING	ISO 8015	Maßstab / SCALE	Titel / TITLE	
		1:2	Sheatmetal_E-Range_X-Axis	
© DESY, DESY behält sich alle Rechte vor. Schutzvermerk R50 16166 beachten. Kopieren und Weitergeben ist ohne Erlaubnis von DESY untersagt.		Werkz. / TOOL	Dokument-Nr. / DOCUMENT NO.	Blatt / SHEET
		Datum / DATE	Name / NAME	1
		21.10.2022	Ahrens, Sören	1
		Rev. / REV.		
		1		
		2		
		3		
		4		
		5		
		6		
		7		
		8		
		9		
		10		
		11		
		12		



1 Stück

Rz 16

Kanten ISO 13715

-0.1
-0.3

+0.3
+0.1

Project / PROJECT	Arbeitspaket / WORKPACKAGE	Gruppe / GROUP	Erstellt / REPLACES	Ersetzt / REPLACED BY
ITk	Prepreg-Robot	ATLAS		
Gewicht / WEIGHT [kg]	Halbzug / SEMI-FINISHED PRODUCT		Werkstoff / MATERIAL	Format / SIZE
1,137	650 x 350 x 1,5mm		1,4301 (X4CrNi18-10)	A2
Fabrikation / TOLERANCING	ISO 8015	Maßstab / SCALE	Titel / TITLE	
		1:2	Sheetmetal_XY-Connection	
		Datum / DATE	Name / NAME	
		18.10.2022	Ahrens, Sören	
© DEFG, DEFG behält alle Rechte vor. Schutzvermerk §92 Nr18 beachten. © DEFG, DEFG behält alle Rechte vor. Schutzvermerk §92 Nr18 beachten. © DEFG, DEFG behält alle Rechte vor. Schutzvermerk §92 Nr18 beachten. © DEFG, DEFG behält alle Rechte vor. Schutzvermerk §92 Nr18 beachten.			Dokument-Nr. / DOCUMENT NO.	Blatt / SHEET
			D10000000805127/A003	1
			D10000000812581	2

6.2 Fertigungsverfahren

Zur Realisierung der Konstruktion wurden folgende Fertigungsverfahren verwendet:

- Fräsen - diverse Adapter, Platten
- Drehen - Kraftübertragung Schwenkeinheit, Zahnriemenrad
- Lasern - Kabeltrassen und Halterungen
- Kanten - Kabeltrassen und Halterungen
- Schweißen - Kabeltrassen und Halterungen
- Tempern - Kunststoff Halbzeug
- Stereolithografie (SLA) oder auch allgemein 3D Druck genannt - diverse Kabel- und Prepregführungen

Die Fertigung der Komponenten wurde komplett bei DESY durchgeführt. Die Fräs- und Drehteile des Werkzeugkopfes sowie die Bleche der Kabelführungen sind überwiegend in der Zentralwerkstatt ZM31 entstanden. Die Fräskomponenten für die Schneideinheit wurde im Mechanischen Labor (MLAB) des FH-Bereiches (Forschung Hochenergiephysik), zu dem auch die ATLAS-Gruppe gehört, ausgeführt. Um das Anhaften des Prepregs an der Schneideinheit zu verhindern und der Klinge eine geringe Reibfläche zu bieten, besteht die Prepreg-Führung aus Polytetrafluorethylen (PTFE), auch als Teflon bekannt. Auf Grund der hohen Eigenspannungen, resultierend aus dem Herstellungsprozess, war das bestellte Material so deformiert, dass eine direkte mechanische Bearbeitung kein brauchbares Resultat geliefert hätte. Aus diesem Grund wurde das Halbzeug mit Hilfe eines regelbaren Ofens für ca. 15 Stunden bei einer Haltetemperatur von $T = 150^\circ\text{C}$ getempert. Dabei wird mit einem langsamen Temperaturanstieg das Material solange erwärmt, bis die Temper-Temperatur erreicht ist. Nun wird die Temperatur für mehrere Stunden gehalten bis das Material gleichmäßig durchgewärmt ist. Nach einer langsamen Abkühlung erhält man ein spannungsarmes Material mit hoch-kristallinem Gefüge. [25] Siehe Abbildung [6.1](#)

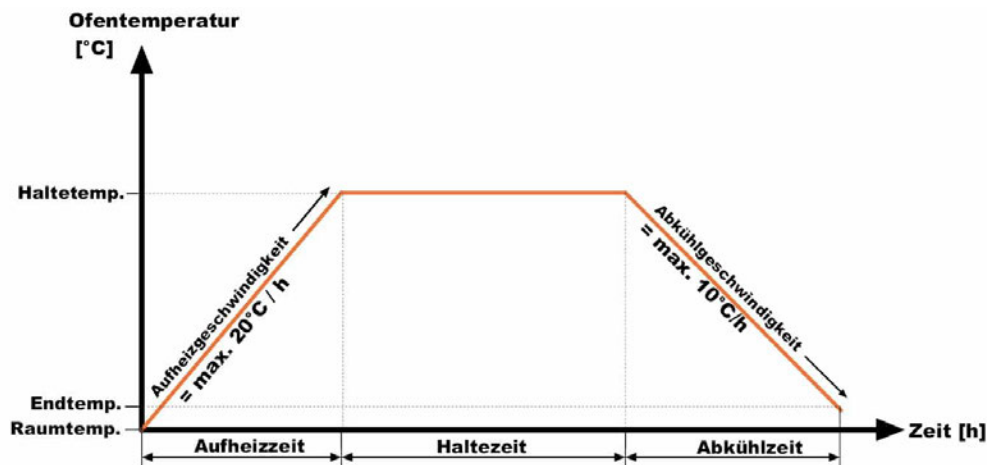


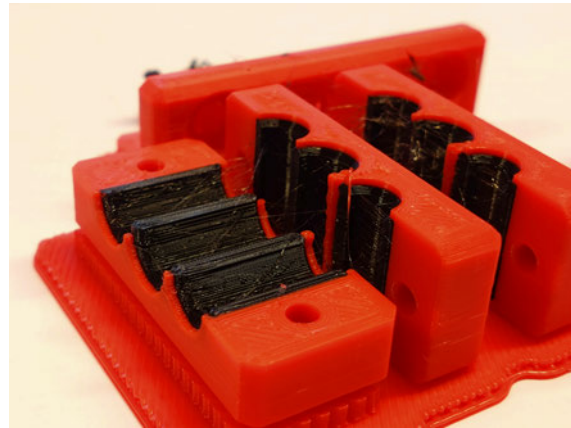
Abbildung 6.1: Diagramm einer Temperaturkurve zum Tempern von Kunststoffen [27]

Vor dem Tempern hatte die PTFE-Platte eine Wölbung von ca. 6 mm auf einer Länge von ca. 400 mm. Nach dem Tempern war die Wölbung nicht mehr signifikant vorhanden und auch nach der mechanischen Bearbeitung ist das Bauteil eben.

Die 3D-Druckteile sind mit einem FDM-3D-Drucker (Fused Deposition Modeling (FDM; deutsch: Schmelzschichtung)) gefertigt. Dieses Verfahren bietet die Möglichkeit, komplexe Geometrien einfach und schnell zu realisieren. Besonders wenn ein Anpassungsbedarf bzw. Versuchsbedarf besteht, eignet sich dieses Verfahren. So wurden unter anderem die Kabelschellen sowie die Führungen für das Prepreg mit diesem Verfahren gefertigt. Der verwendete Drucker verfügt über zwei Druckdüsen wodurch z.B. das Bauteil durch eine auswaschbare Stützstruktur (hier PVA - Polyvinylalkohol) hergestellt werden kann. In der Abbildung 6.2 (a) ist auf der linken Seite das fertige Bauteil aus PLA (Polylactid) und auf der rechten Seite das Bauteil mit Stützstruktur vor dem Auswaschen dargestellt. Die Bohrungen dienen zur Aufnahme von Schrauben und Muttern, wodurch sich das Bauteil auf der Transportwelle klemmen lässt. In der Abbildung 6.2 (b) sieht man Kabelhalterungen aus dem Grundkörper und einem Gummikern (hier TPU - Thermoplastisches Polyurethan), der die Ummantelung des Kabels klemmt, aber nicht quetschen kann.



(a) Prepreg-Führung



(b) Kabelhalterung

Abbildung 6.2: 3D-Druck Bauteile

6.3 Montage und Ausrichtung des Gestells


Ausgehend vom Gestell baut sich das gesamte Roboter-Portal auf und gibt damit die Genauigkeit der zueinander laufenden Achsen vor. Aus diesem Grund sind alle Profile mit einer Längentoleranz von $\pm 0,1$ mm direkt von Rose + Krieger bestellt worden. Mit Hilfe von rechtwinkligen Maschinenwinkeln und Paralleleisen sind die Profile zueinander ausgerichtet und anschließend montiert worden. Da die Füße auf höhenverstellbaren Heberollen stehen und der Untergrund uneben ist, war bei der Montage und dem händischen Ausrichten klar, dass keine Ausrichtung erfolgen kann, die genau genug ist. Die Parallelität der Schlitten auf den X-Achsen war zueinander um 3 mm verschoben. Aus diesem Grund wurde das Gestell mit Hilfe eines 3D-Messarms und dem Kollegen Florian Andresen aus der Gruppe ZMQS auf die Ebenheit des Gestells sowie die Winkel zwischen der X- und Y-Achse untersucht. Die Messung bestätigte die obige Annahme. Die Ebenheit des Gestells, die Rechtwinkligkeit zwischen Gestell und Portal sowie die Rechtwinkligkeit zwischen den Schlitten der X- und Y-Linearachsen lagen weit außerhalb der erforderlichen Werte. Durch ein Messprotokoll erkennt man sofort die Ausrichtung des Gestells. Mit Hilfe der einstellbaren Füße wurde solange an den Stellschrauben gedreht, bis die Ebenheit einen geeigneten Wert erreicht hat. In diversen Messungen und Anpassungen wurde das Gestell ausgerichtet. Die Ausrichtung der X-Linearachsen erfolgt über die passgenauen Adapterplatten, die gegen die Nut auf der Unterseite des R+K-Profiles und auf der Oberseite gegen die Nut der Linearschiene geschoben werden. Durch

die feste Montage der Y-Achse auf dieser festen Schiene wird die gegenüberliegende X-Linearachse ausgerichtet. Diese liegt lediglich lose auf den Adapterplatten und hat somit die Möglichkeit sich zu verschieben. Beim manuellen Verfahren der Y-Achse stellt sich eine Parallelität der beiden X-Achsen ein. Nach dem Festziehen der zweiten X-Achse wird das Gestell nochmal vermessen. Mit Hilfe des Messarms konnte das gesamte Gestell inklusive Portal an einem halben Tag ausgerichtet werden. Zum Vergleich der Messwerte vor und nach der Ausrichtung sind in der Tabelle 6.1 die Werte aufgelistet:

Tabelle 6.1: Portalausrichtung: Werte sind Angaben über die gesamte Länge der Linearachsen

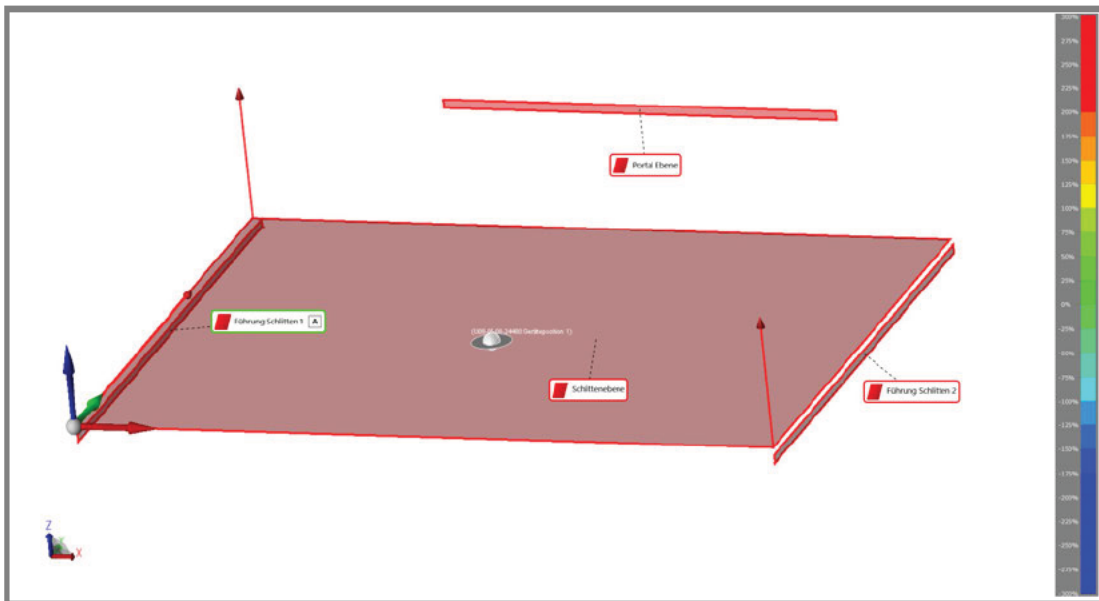
	Tischebene	Rechtwinkligkeit Gestell/ Portal	Rechtwinkligkeit X- zu Y-Achse
Anfangszustand	3 mm	1,7 mm	3 mm
Zwischenschritt	1,3 mm	0,3 mm	0,5 mm
Endergebnis	0,26 mm	0,1 mm	0,08 mm

In der Grafik des Messprotokolls, siehe Abbildung 6.3, ist die Ebene des Portaltisches sowie die beiden X-Linearachsen und die Y-Linearachse dargestellt. Des Weiteren sind die gemessenen Werte und deren Referenz aufgelistet. Nach erfolgreicher Ausrichtung werden die weiteren Komponenten montiert. Hierzu gehören der Schaltschrank mit den Kabelführungen, Getriebe mit Elektromotoren, die Grundplatten des Tisches sowie der Werkzeugkopf und die gesamte Verkabelung am Gestell. Die Energieleitungen (Pneumatik für die Zylinder, Stromversorgung Elektromotor, Steuerleitungen Endlagenschalter) des Werkzeugkopfes entstanden auf Grund der Komplexität nicht im CAD, sondern während des Montageprozesses. Die Halterungen zur Führung der Kabel und Pneumatikleitungen sind erst jetzt konstruiert und am 3D-Drucker umgesetzt worden. Durch den dreh- und schwenkbaren Werkzeugkopf hat sich dieser Teil in der Entwicklung zwar als komplex dargestellt, dennoch sind die Einzelkomponenten mit Hilfe der additiven Fertigung einfach gehalten. Die Variablenvielfalt und die Masse an Teilen wäre mit Hilfe von konventionellen Fertigungsmethoden aufwendig herzustellen.

FARO Technologies Inc.			
125 Technology Park FL 32746 Lake Mary USA		http://www.faro.com [Redacted] [Redacted] 09 Jan 2023 01:31	

Sitzungsinformationen

Bauteilname	Portal Roboter
Bediener	F. Andresen
Telefonnr.	[Redacted]
Datum	06.01.2023
Uhrzeit	13:31
Aktives Gerät	U08-05-08-24480



Schlittenebene		Messergebnisse: 8.					
		Istw.	Sollwert	Abw.	-Tol.	+Tol.	Außer Tol.
Ebenheit		0,259mm		0,259mm	0,000mm	0,050mm	0,209mm

6 Realisierung der Konstruktion

Führung Schlitten 1		<i>Messergebnisse: 4. Bezugsgröße: A.</i>					
		Istw.	Sollwert	Abw.	-Tol.	+Tol.	Außer Tol.
Ebenheit	▭	0,010mm		0,010mm	0,000mm	0,050mm	0,000mm

Führung Schlitten 2		<i>Messergebnisse: 4.</i>					
		Istw.	Sollwert	Abw.	-Tol.	+Tol.	Außer Tol.
Ebenheit	▭	0,003mm		0,003mm	0,000mm	0,050mm	0,000mm
Parallelität A	//	0,222mm		0,222mm	0,000mm	0,050mm	0,172mm

Portal Ebene		<i>Messergebnisse: 4.</i>					
		Istw.	Sollwert	Abw.	-Tol.	+Tol.	Außer Tol.
Ebenheit	▭	0,015mm		0,015mm	0,000mm	0,050mm	0,000mm
Rechtwinkligkeit A	⊥	0,079mm		0,079mm	0,000mm	0,050mm	0,029mm

Abbildung 6.3: Messprotokoll Portal

6.4 Inbetriebnahme/ Programmierung

Nach erfolgter Montage erfolgt die Inbetriebnahme und die Programmierung der Steuerung. Durch die manuell bedienbaren Motorcontroller lassen sich über einen PC die Motoren konfigurieren. Mit Hilfe des Supports von Siemens konnte der Bewegungsapparat zügig in Betrieb genommen und erste Erfahrungen gesammelt werden. Um Befehle durch den Bediener anzunehmen und diesem eine Hilfestellung zu geben, ist ein Bedienpult vorhanden (siehe Abbildung 5.18). Da das Grundlagenwissen der SPS-Programmierung (SPS - Speicherprogrammierbare Steuerung) vorhanden ist, wurde zunächst mit der Ansteuerung des Bedienpults begonnen. Die manuelle Betätigung der Elektromotoren konnte ebenfalls zügig mit eingebunden werden. Um einen voll automatisierten Prozess abzubilden, sodass der Roboter jeden Schritt selbstständig abfährt, ist es nötig, die Programmierung zu verfeinern. Mit Hilfe von Beispielprogrammen von Siemens, z.B. zur Realisierung eines Pick-and-Placeroboters, wurde versucht, die Motorensteuerung über eine tabellarische Koordinatenmatrix anzusteuern. Erste Versuche wurden hiermit gestartet und auf Grund der Komplexität für eine spätere Modifizierung vorgesehen. Zum zügigen Erreichen des Ziels, wurde anschließend jeder Schritt in einer Abfolge programmiert. Nach diversen Tests und Anpassungen zeigte sich, dass der Roboter in der Lage ist, Prepreg abzulegen. Verwendung fand ein länger abgelaufenes Halbzeug mit 6" Rollenbreite, anstatt der 12", die vorgesehen sind. Dennoch konnten die wichtigsten und komplexesten Prozesse, wie das Schneiden und Ablegen, demonstriert werden. Ein Tape mit einer Breite von 12", welches direkt aufgenommen werden kann und eine höhere Klebrigkeit aufweist, ist einfacher abzulegen. Die Tests zeigten auch, dass die angenommene Drehmomentsteuerung der Fördereinheit nicht wie erwartet funktioniert. Die Grundidee, das Prepreg durch das Verfahren des Portals auf Spannung zu halten, wird durch Unsicherheitsfaktoren wie der ungleichmäßigen Reibung der Schleifkupplung an der Materialrolle sehr komplex. Durch die flexible Steuerung konnte dieser Umstand allerdings unkompliziert behoben werden und die Drehzahlen zwischen Prepreg-Antrieb und Portalantrieb synchronisiert werden. Die Aufwickelgeschwindigkeit muss allerdings durch den sich ändernden Durchmesser angepasst werden. Eine mathematische Funktion zu implementieren, greift hier zu kurz. Nach einer Recherche stellte sich heraus, dass speziell für diesen Anwendungsfall eine Bibliothek zur SPS-Programmierung von Siemens vorhanden ist, mit dem diese Anpassung realisiert werden kann. Diese Aufgabe muss in der Zukunft umgesetzt werden. Eine weitere Anpassung muss bei der Motoransteuerung des Prepreg-Antriebes vorgenommen werden. Die geringe Drehzahl bewirkt, dass die Regelung nicht ausreichend arbeitet und sich hohe Beschleunigungswerte von $a = 4 \text{ m/s}^2$ ergeben, wodurch sich eine

stockende Bewegung einstellt. In der Abbildung 6.4 ist dieser Effekt deutlich sichtbar (in orange ist die Geschwindigkeit und in lila die Beschleunigung dargestellt).

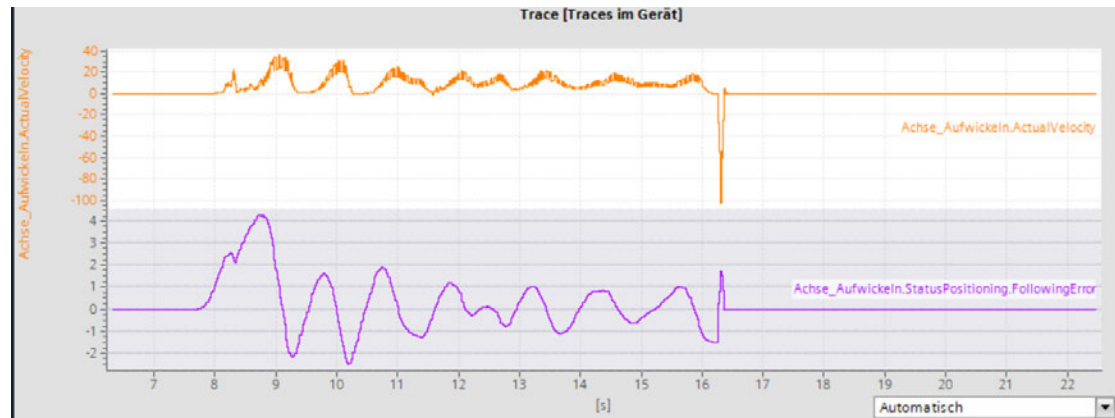


Abbildung 6.4: Drehdynamik Aufwickelmotor

Zum Vergleich sieht man in der Abbildung 6.5 eine Fahrkurve der konfigurierten Y-Achse mit den sich einstellenden Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerten. Hier beträgt die Beschleunigung nur noch lediglich einen Wert von $a = 0,4 \text{ m/s}^2$. Das angeflanschte Getriebe an der Y-Achse bewirkt nicht nur eine Kraftübersetzung, sondern durch die Drehzahlerhöhung der Getriebestufe mit einem Übersetzungsverhältnis von $i = 1 : 20$ auch einen ruhigeren Lauf. Die Abweichung zwischen Soll- und Istwert wird durch die Drehzahlerhöhung des Motors ebenfalls proportional kleiner, wodurch die Regelung besser nachsteuern kann; ein ruhigerer Lauf stellt sich ein. Dieser Effekt soll nun auch für den Antrieb der Aufwickleinheit genutzt werden. Durch leichte Anpassungen am Zahnriemenrad kann auch hier ein Getriebe verwendet werden.

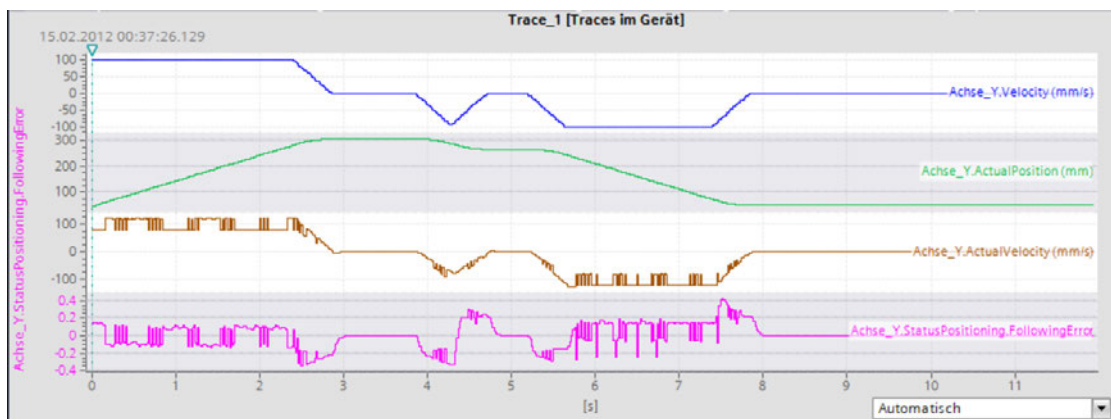


Abbildung 6.5: Fahrdynamik Y-Achse

7 Zusammenfassung und Ausblick

In der Teilchenforschung kommen Großexperimente zum Einsatz, die an Teilchenbeschleunigern angesiedelt sind und dort die Kollision von entgegenlaufenden Teilchenpaketen detektieren. Auf Grund der hohen Strahlung in diesen Anlagen ergeben sich hohe Anforderungen an die Konstruktion und die zu verwendeten Materialien. Der hier betrachtete ATLAS-Detektor ist das größte Experiment an dem weltweit größten Teilchenbeschleuniger, dem Large-Hadronen-Collider am CERN in Genf. Die ATLAS-Gruppe am DESY beschäftigt sich mit der Entwicklung und dem Bau von präzisen und leichten Tragstrukturen für Streifensilizium-Sensoren, die in den beiden Endkappen, des inneren Teils, dem ITk (Inner Tracker) des ATLAS-Experimentes zum Einsatz kommen. Auf Grund der Ablenkung von Materialien mit hoher Dichte wird der Einsatz von Metallen so gut es geht reduziert, es kommen Faser-Verbunde zum Einsatz, durch deren Bauteileigenschaften hochpräzise Teilchendetektionen ermöglicht werden.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Optimierung einer Fertigung von Faserverbundkomponenten. Die manuelle Ablage von drei unidirektionalen Prepreg-Lagen (vorimprägnierte Kohlenstoffasern) soll so optimiert werden, dass eine Automatisierung des jetzigen eingesetzten Prozesses implementiert werden kann. In diversen Versuchen wurden Teillösungen zum werkzeuggeführten Ablegen des Halbzeuges untersucht und in Konzepte eingliedert. Auf Grund der großen Stückzahl sowie der Reproduzierbarkeit werden im Flugzeug- und Fahrzeugbau automatisierte Fertigungsanlagen verwendet, deren Einsatz hier beschrieben ist. Sogenannte Tape-Layer (ATL - automated tape laying) dienen durch Verwendung des breiten Prepregs von 12" (304,8 mm) als Vorbild. Da ihr komplexer Aufbau und die finanzielle Investition in keinem Verhältnis zu dem hier anzuwendenden Fall stehen, soll eine Eigenentwicklung vorgenommen werden. Die zuvor betrachteten Funktionsprinzipien werden zusammen mit auf dem Markt verfügbaren Komponenten in einer Lösungsmatrix aufgelistet und in mehreren sinnvollen Gesamtkonzepten zusammengefasst. Mit dem Wertigkeitsverfahren werden in einer Lösungsmatrix die Gesamtkonzepte verglichen und bewertet. Die favorisierte Lösung wird nun weiter detailliert und in Teilsysteme unterteilt. Durch die Unterteilung in kleinere Baugruppen, die zudem in sich ein

funktionsfähiges Teilsystem darstellen, lassen sich Entwicklungs- und Bestellprozesse diversifizieren. Eine erhebliche Zeitersparnis sowie die Reduzierung jedes Teilsystems stellt sich ein. Die Konstruktion wird mit einem CAD-System umgesetzt und detailliert abgebildet. Die anschließende Fertigung sowie Entwicklung der Steuerung werden ebenfalls ausführlich dargestellt.

Durch diese Arbeit entstand ein Roboter, der automatisiert Prepreg in zwei Achsen (0° 90°) ablegen kann, um eine Massenproduktion zu vereinfachen. Durch den modularen Aufbau kann die Maschine soweit modifiziert werden, dass auch weitere Ablagerichtungen, wie z.B. der eines typischen Flugzeugbau-Laminates (0° | ± 45 | 90)_s, darstellbar sind. Hierfür ist eine Modifikation des Werkzeugkopfes und der Steuerung vorzunehmen. Zusammengefasst konnte gezeigt werden, dass mit einfachen Mechaniken sehr komplexe Industrieroboter auf einfache Anwendung so reduziert werden können, dass auch für kleinere Fertigungen eine Automatisierung möglich ist.

Literaturverzeichnis

[1] Persönliche Kommunikation. – Maximilian Felix Caspar interviewt von Sören Ahrens im Mai 2023

[2] *Bilder aus Morphologischem Kasten.* – URL [https://wi.uni-potsdam.de/homepage/lehrewi.nsf/0/2657708138b07a2dc1257f9b002f8f4d/\\$FILE/PI_VL10%20-%20Robotik1.pdf](https://wi.uni-potsdam.de/homepage/lehrewi.nsf/0/2657708138b07a2dc1257f9b002f8f4d/$FILE/PI_VL10%20-%20Robotik1.pdf). – <https://www.roboter-bausatz.de/p/linearfuehrung-mgn12h-500mm> <https://www.rk-rose-krieger.com/deutsch/produkte/lineartechnik/lineareinheiten/linearachsen-mit-spindelantrieb> <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTUL33juin0Doz5yz3FS-PPEvsrhd9uAiRRLrBPst4NFOLW3ZUcyd4HCdIe7hAklWF3iJs&usqp=CAU> <https://www.automate.org/images/imglibrary/MCMA-blog-linear.jpg> https://www.tgb-group.com/wp-content/uploads/2023/01/TGB_Group_Slewing-Drive_LBE435_front.webp https://www.festo.com/media/pim/126/D15000100116126_1056x1024.jpg <https://www.techniker-forum.de/attachments/umlenkung-luftzylinder-jpg.50458/> <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTu0xDoXXAY1VGe71QfCe3pnTKC2E1ipVmmxg&usqp=CAU> https://www.festo.com/media/pim/228/D15000100143228_488x366.jpg https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSliOMzNnAUI75pTkN66K4pAmG5MxZEmNWj99ubj-yZk0r_CCQEU-i73oESV-idHWcZRTA&usqp=CAU https://www.interroll.com/fileadmin/_processed_/f/6/csm_cassette-system_1840x400_30dbf6d8b7.webp https://www.maccon.de/fileadmin/user_files/redaktion/bilder/Produkte/Servomotoren/Akribis/ACW_1.png https://www.festo.com/de/de/p/elektrozylindereinheit-id_EPCS/ <https://www.festo.com/de/de/c/produkte/fabrikautomation/antriebe-aktuatoren/pneumatische-zylinder/>

[kolbenstangenzyylinder-id_pim215/ https://www.festo.com/de/de/c/produkte/fabrikautomation/antriebe-aktuatoren/pneumatische-zyylinder/schwenkantriebe-id_pim217/](https://www.festo.com/de/de/c/produkte/fabrikautomation/antriebe-aktuatoren/pneumatische-zyylinder/schwenkantriebe-id_pim217/) https://igus.widen.net/content/hkncuzimcq/webp/IGL_PROD_PRT-04-00-Micro_1.webp?width=1024&height=680&quality=65<https://www.slg-leitlagertechnik.de/product/gleitlager-bundbuchsen-slbf/> <https://chemify.com/image/cache/catalog/items/vienvirziena-prepreg-ogleklis-200g-m2-a10864-550x550w.jpg> <https://www.kugellager-premium.de/Waelzlager/Axialkugellager-51200-JP-10x26x11-mm.htm?SessionId=&a=article&ProdNr=A0000008982&p=94> <https://www.oem24.pl/de/produkt/siemens-simotics-s-1fl6-servomotor-1fl6032-2af21-1la1/> <https://www.sorotec.de/shop/Schrittmotor-1-8-Nm-4-2-A.html> <https://www.konstruktionspraxis.vogel.de/funktionsprinzip-und-anwendungs-moeglichkeiten-von-linearmotoren-a-150746/> <https://www.reichelt.de/buerstenloser-gleichstrommotor-36-v-dc-4000-u-min-qbl5704-94-4-32-p246311.html> <https://www.bolek-shop.de/magazin/prepregs-herstellung-und-verarbeitung/> http://www.plottermesser.info/images/Messerhalter_prinzip.jpg https://www.fritzadamshop.de/media/image/c7/e3/4b/412011000_1_1280x1280.jpg https://de.farnell.com/productimages/large/de_DE/3051885-40.jpg https://de.farnell.com/productimages/standard/en_GB/2290007-40.jpg <https://5.imimg.com/data5/SELLER/Default/2023/2/EB/UT/UR/46286824/sinamics-v90-400w-single-phase-drive-6sl3210-5fb10-4ua1--500x500.png> https://www.baumer.com/medias/sys_master/images-content/images-content/h92/h2c/8839480999966/Einweglichtschranke-v2.png https://www.pilz.com/imagecache/mam/pilz/images/import/01_Products_and_Solutions/F_applications/fittosize__752_0_9a593a3c33797d0f8727723dbd09ba37_g_psen_opt_ii_hand_protection_robot_cell_with_light_curtains_2018_01_1000x562-mobile-1581519377.jpg https://www.elsinger.at/isotope/f/fps_einhausung.jpg<https://www.kfz-tech.de/Bilder/Formelsammlung/Drehmoment.jpg><https://www.mouser.de/images/marketingid/2022/img/190408501.png?v=040123.0123> <https://www.zd-motor.de/Produkte/Planetengetriebe-ZDE-ZDF-ZDWF->

ZDS/Planetengetriebe-ZDE-Serie/Planetengetriebe-oxid.html
https://www.flohr-industrietechnik.de/flohr-wAssets/img/galleries/gallery_224453/atek-winkel-planetengetriebe/Flohr_ATEK_Winkel-Planetengetrieb-BPCE_060_Schnitt1_600x400.png
<https://www.ganternorm.com/de/produkte/3.6-Bewegen-Uebertragen-mit-Wellen-und-Gelenken/Getriebe/GN-3975-Schneckengetriebe-Gehaeuse-Aluminium> https://www.igus.de/contentData/wpck/images/global/multi_column/sizes/Festooning_570.jpg <https://blog.igus.de/knowledge-base/was-ist-das-untertrum-bei-einer-energiekette/> <https://www.directindustry.de/prod/paul-vahle-gmbh-co-kg/product-19699-1983149.html> <https://media.cdn.kaufland.de/product-images/1024x1024/64a59414bb8b143977e7a48a913b551d.jpg>
https://www.rk-rose-krieger.com/uploads/tx_forty3easyadmin/Plotter-Grundgestell.jpg <https://industriupply24.com/images/virtuemart/product/01415566.jpg> http://cnc.aueberbach.de/wp-content/uploads/IMG_6917-11.jpg https://res.cloudinary.com/rsc/image/upload/bo_1.5px_solid_white,b_auto,c_pad,dpr_2,f_auto,h_399,q_auto,w_710/c_pad,h_399,w_710/R8643970-01?pgw=1 https://endustri24.de/images/product_images/popup_images/Bild_236133_2_norm.jpg
<https://ssd-armaturenshop.de/media/image/product/109791/md/schell-005060099-elektro-verteilerkasten-sws.jpg>
<https://www.manutan.de/img/S/GRP/ST/AIG1838391.jpg> <https://i.ebayimg.com/thumbs/images/g/TYgAAOSwht1f2iQ8/s-l225.jpg>
<https://www.sbc-trading.fr/images/Image/lame-aristo-7265CITO-1.png> https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:fcec7d93-f57a-4e07-8967-024327b468ab/width:1024/im2019030269df_300dpi.jpg <https://feltron-zeissler.de/shop/s7/100524-simatic-s7-1500-cpu-1518-4-pn-dp.html>
https://www.industr.com/de/__image/a/2472514/alias/xl/v/3/c/138/ar/flexible/fn/KR_QUANTEC_Foundry_02.jpg

- [3] : *Schematische Darstellung des LHC. Grafik.* – URL https://www.weltmaschine.de/cern_und_lhc/lhc/

- [4] : *Schematischer Aufbau eines Detektors in der Hochenergiephysik.* – URL https://www.weltmaschine.de/cern_und_lhc/experimente_am_lhc/so_funktioniert_ein_detektor/
- [5] *Spezifischer Modul.* https://de.wikibrief.org/wiki/Specific_modulus. – Zugriff am: 31. Oktober 2023
- [6] : *Weg Weiser.* – URL https://pr.desy.de/sites/sites_desygroups/sites_extern/site_pr/content/e104098/e104111/HERA_Wegweiser_ger.pdf. – Zugriffsdatum: 03.10.2023
- [7] : *Reißlänge.* Web. August 2023. – URL <https://de.wikipedia.org/wiki/Rei%C3%9Fl%C3%A4nge>
- [8] : *R+G.* Web. Juni 2023. – URL [https://www.r-g.de/wiki/Kohlefasern_\(Carbon\)](https://www.r-g.de/wiki/Kohlefasern_(Carbon))
- [9] : *Teilchenbeschleuniger.* Web. Feb. 2023. – URL <https://www.chemie.de/lexikon/Teilchenbeschleuniger.html>
- [10] : *Virtueller Rundgang.* Web. Feb. 2023. – URL https://vtour.desy.de/desytour/index_de.html#node5
- [11] : *Welt der Physik.* Web. März. 2023. – URL <https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/experimente/teilchenbeschleuniger/cern-lhc/lhc-experimente/uebersicht-ueber-die-lhc-experimente/>
- [12] : *Weltmaschine.* Web. Feb. 2023. – URL https://www.weltmaschine.de/cern_und_lhc/lhc/wie_funktioniert_der_lhc/
- [13] ARLING, Jan-Hendrik: *Detection and Identification of Electrons and Photons: Applications in the ATLAS Experiment, for the ATLAS ITk Detector and at the DESY II Test Beam.* Dortmund, Deutschland, Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl für Experimentelle Physik IV, Fakultät Physik, Dissertation, Juli 2020
- [14] AUTHOR: *Carbonisierung von Polyacrylnitrilfasern mittels Diodenlaserstrahlung.* – URL <https://publications.rwth-aachen.de/record/792915/files/792915.pdf>. – Zugriffsdatum: 15.08.2023
- [15] CARLI, C.: *Teilchenbeschleuniger.* – URL <https://indico.cern.ch/event/50160/contributions/2019876/attachments/963033/1367315/BeschleunigerEinfuehrung.pdf>

- [16] COLLABORATION, ATLAS: Technical Design Report: A High-Granularity Timing Detector for the ATLAS Phase-II Upgrade. URL <http://cds.cern.ch/record/2719855/files/ATLAS-TDR-031.pdf>, 2018. – Forschungsbericht
- [17] COMPOSITE, Toray A.: *Product data sheet*. TORAY EX1515 PDS v5.1 2020-01-28. – URL https://www.toraytac.com/media/57c4813d-ce39-4b11-a5f4-11c3aaeeef4/14xkyg/TAC/Documents/Data_sheets/Thermoset/UD%20tapes%20and%20prepregs/EX-1515_Cyanate-Ester_PDS.pdf
- [18] DESY: *Corona-Forschung*. – URL https://www.desy.de/aktuelles/corona_forschung/index_ger.html
- [19] DESY: *Das genaue Bild des Protons*. – URL https://www.desy.de/aktuelles/news_suche/index_ger.html?openDirectAnchor=829
- [20] DESY: *Flotter Bosonen-Dreier beim ATLAS-Experiment*. Web. Sept. 2023. – URL https://www.weltmaschine.de/neuigkeiten/neuigkeiten_archiv/2023/flotter_bosonen_dreier_beim_atlas_experiment/
- [21] DESY: *Teilchenquellen*. 2023. – URL <http://kworkquark.desy.de/lexikon/lexikon.teilchenquellen/1/index.html>. – Stand Oktober 2023
- [22] FIBER, Mitsubishi Chemical C. ; COMPOSITES, Inc: *Selector Guide Pitch Fiber*. – URL <https://mccfc.com/pitch-fiber/>. – note
- [23] FIBER, Mitsubishi Chemical C. ; COMPOSITES, Inc: *Carbon Fiber and Advanced Composite Materials*. 2023. – URL <https://www.mitsubishi-chemical.de/accounts/mce/dropbox/cadki.pdf>
- [24] FSP103-ATLAS: *Der ATLAS-Detektor*. 2023. – URL <https://www.fsp103-atlas.de/e17619/>
- [25] GMBH, Licharz: *Konstruieren mit technischen Kunststoffen*. – URL https://www.ktw-gornau.de/media/files/PDF-Dateien/Broschuere_Kunststoffe_Bearbeitung_und_Nachbehandlung.pdf
- [26] GMBH, R+K R.: *RK Auswahlhilfen*. online. – URL https://www.rk-rose-krieger.com/fileadmin/catalogue/auswahlhilfen/rk_auswahlhilfen_de.pdf. – Zugriffsdatum: 22.06.2023

- [27] GMBH, Wolf Kunststoff-Gleitlager: *Thermische Nachbehandlung von Halbzeugen*. Web. September 2023. – URL <https://www.zedex.de/wissenszentrum/verarbeitungsverfahren>
- [28] GUSTOWSKI, Simon: *Untersuchung von numerischen Modellierungsverfahren für Verbindungen von Sandwichstrukturen im Flugzeugbau*. – URL https://reposit.haw-hamburg.de/bitstream/20.500.12738/7911/1/MA_Gustowski_Simon.pdf
- [29] HODER, Hilmar: *Methodisches Konstruieren (Marktorientierte Produktentwicklung) Teil 1 bis 4*. Skript. 2011
- [30] HUBER, Prof. Dr.-Ing.: *Entwurf und Dimensionierung von Sandwichstrukturen, Skript zur Vorlesung*. Web. August 2018. – URL <https://de.wikipedia.org/wiki/Rei%C3%9Fl%C3%A4nge>
- [31] LENGSELD, Hauke ; WOLFF-FABRIS, Felipe ; KRÄMER, Johannes ; LACALLE, Javier ; ALTSTÄDT, Volker: *Faserverbundwerkstoffe: Prepregs und ihre Verarbeitung*. München : Carl Hanser Verlag München, 2015. – ISBN 978-3-446-43300-7
- [32] LHC-FACTS: *LHC - ATLAS Detektor*. 2023. – URL <https://www.lhc-facts.ch/index.php?page=atlas>
- [33] LIEBAUG, Reimo Schaaf / B.: *DESY Campus 2020*. – URL https://photon-science.desy.de/sites/site_photonscience/content/e66/e241467/e315129/e315135/DESY_Campus_August_2020_eng.jpg
- [34] LIU, Wei ; ZHANG, Lefei ; LI, Xia ; SHEN, Chunhua ; CHENG, Ming-Ming: Deep learning for remote sensing data: A technical tutorial on the state of the art. In: *Science China Information Sciences* 63 (2020), Nr. 19, S. 1–42
- [35] MASON, Evan: *Illustration of a Duoplasmatron*. Web. Feb. 2023. – URL <https://www.cosmos-indirekt.de//Physik-Schule/Duoplasmatron>
- [36] NICO GÖRRISSEN, Dario A.: *Petal*
- [37] PAHL, G. ; BEITZ, W. ; FELDHOUSEN, J. ; GROTE, K. H.: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. Berlin, Deutschland : Springer, 2013. – URL <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-57303-7>

- [38] POOTH, Oliver: *Was ist eigentlich Luminosität?* Web. Sept. 2023. – URL https://www.weltmaschine.de/neuigkeiten/ask_an_expert/luminositaet/
- [39] ROSENMAIER, Armin: *Prepregs: Die Formel 1 der Faserverbundtechnik.* Web. Juni 2023. – URL <https://www.hintsteiner-group.com/blog/prepreg>
- [40] SCHÜRMAN, Helmut: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden.* Berlin : Springer, 2007. – ISBN 978-3-540-72189-5
- [41] SERGIO DÍEZ, Miguel Ángel V.: *SPECIFICATION STRIP PETAL CORES.* EDMS NO. 2027757
- [42] WIKIPEDIA: *Periodensystem* – *Wikipedia.* 2023. – URL <https://de.wikipedia.org/wiki/Periodensystem>
- [43] WIKIPEDIA: *Strahlungslänge* – *Wikipedia.* 2023. – URL <https://de.wikipedia.org/wiki/Strahlungsl%C3%A4nge>

A Anhang

Masterthesis Aufgabenbeschreibung

Thema: Automatisierung einer Prepreg-Produktion

Student: Sören Ahrens, Matrikel-Nr.: [REDACTED]

Im Rahmen des ATLAS-Detektor Upgrades am LHC in Genf werden die vorhandenen Endkappen durch leistungsfähigere Sensoren ersetzt. Hierin werden neuentwickelte Sandwich-Tragstrukturen integriert, auf deren Oberfläche sich moderne Streifensiliziumchips befinden. Diese neue Sensorgeneration sorgt dafür, die Aufnahmequalität vom ATLAS-Detektor zu erhöhen. Die Sandwich-Tragstrukturen, genannt Petals, wurden am DESY in Hamburg entwickelt und werden für die Serie auch teilweise dort gebaut. Jedes Petal besteht aus zwei sogenannten Facings, den Deckschichten des Sandwich. Diese werden aktuell im Handlaminierverfahren gefertigt und anschließend im Autoklaven ausgehärtet. Zur serienreifen Produktion der Facings soll ein Roboter entwickelt und gebaut werden, der den Laminierprozess übernimmt bzw. erheblich vereinfacht.

In der Thesis soll das gesamte Konzept eines solchen Roboters betrachtet werden. Das betrifft die Entwicklung sowie Konstruktion eines geeigneten Roboters inklusive Werkzeugkopf zum automatisierten Legen von Prepreg. Verwendet wird ein 6"- oder 12"-breites UD-Tape, welches sich auf Rollen befindet. Die Konstruktion erfolgt in dem CAD-System Siemens NX und muss im PLM-System Teamcenter abgelegt werden. Die Planung mit externen Firmen (z.B. Zulieferer für Steuerung und Linearantriebe) zum Realisieren einer kompletten Maschine sind in der Entwicklungsarbeit inbegriffen. Des Weiteren soll die Maschine gefertigt und getestet werden. Die Maschinenarbeiten zum Fertigen der einzelnen Komponenten sind nicht Aufgabe der Thesis. Zur Montage sowie Verdrahtung können Kolleg*innen als Unterstützung mitwirken. Die Programmierung der Steuerung soll soweit erfolgen, dass das Funktionsprinzip sichtbar ist. Eine komplette Automatisierung ist nicht zwingend erforderlich.

Betreuer:

HAW-Hamburg:

Prof. Dr.-Ing. Michael Seibel
(Prof. im Bereich Flugzeugbau)

DESY:

Dr. Sergio Díez Cornell
(Technischer Koordinator in der DESY-ATLAS Gruppe)


Zeitraum der Masterthesis:

20. Juni bis 19. Dezember 2023

Abbildung A.1: Aufgabenbeschreibung Masterthesis

Lineareinheiten Auswahl : Ergebnisse

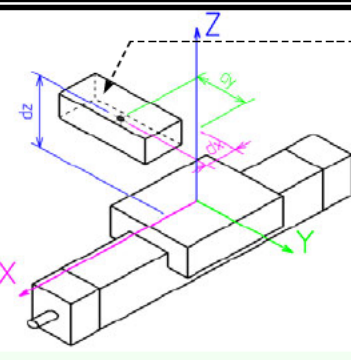
Version 2.23

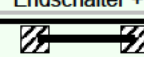
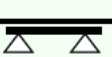


RK ROSE+KRIEGER

Kunde : Desy Herr Ahrens		Datum : 24.05.2022	
Projekt : Y Achse Verlegekopf			

Anwendungsdaten	Zyklus	Phase ->	Beschleunigung	Linear	Verzögerung	Total
	Weg		50,1 mm	1399,8 mm	50,1 mm	1500 mm
	Zeit		0,334 s	4,67 s	0,334 s	5,33 s
	<input checked="" type="checkbox"/> Beschleunigung = Verzögerung					
	Geschwindigkeit		0,300 m/s			
Beschleunigung		0,90 m/s ²		0,90 m/s ²	Genauigkeit : ± 0,1 mm	

Anwendungsdaten	Kräfte		Masse : 60 kg	Ausrichtung		
			dx : mm	Vertikal <input type="radio"/> (Schwerkraft nach X)		
			dy : 0 mm	Horizontal <input type="radio"/> (Schwerkraft nach Y)		
			dz : mm	Horizontal <input checked="" type="radio"/> (Schwerkraft nach Z)		
				<input type="checkbox"/> MT		
			Schwerkraft	Dynamisch	Andere	Total
		Fx	0 N	55 N	N	55 N
		Fy	0 N		N	0 N
		Fz	609 N		N	609 N
		Mx	0 Nm		Nm	0 Nm
		My	0 Nm	0 Nm	Nm	0 Nm
		Mz	0 Nm	0 Nm	Nm	0 Nm
		Sonstige mitbewegte Massen :				kg

Lineareinheit	MonoLine Z 40 (TB12B1F4A11A0)		Antriebsart : ZR 15	
	Gesamtlänge : 1850 mm	Führungsschlittengewicht : 0,90 kg		
	Gesamter Hub : 1600 mm	Grundlänge : 250 mm	Gesamtgewicht : 6,26 kg	
	Fx : 420 N	Mx : 14 Nm	Max. Geschw. : 5,000 m/s	
	Fy : 1.100 N	My : 35 Nm	Max. Hub : 5.465 mm	
	Fz : 694 N	Mz : 55 Nm	Genauigkeit : 0,1 mm / 300 mm	
	Mechanisch *		Nährungsschalter	
	Endschalter : -	-		
	Halter : -	-		
	Endschalter + Halter : 91925	92850		
 2,4 mm ≤ Theoretische Durchbiegung ≤ 9,7 mm 				
* : ACHTUNG : Bitte überprüfen Sie, ob mechanische Endschalter mit Ihrer Steuerung technisch möglich sind.				

Ausgewählte Produkte	Servomotor RK-AC 240 mit Getriebe 10:1	
	Errechnete Daten	
	Drehzahl : 212 min ⁻¹	Max. Drehzahl : 330 min ⁻¹
	Stat. Drehmoment : 0,4 Nm	Max. Drehmoment : 23,52 Nm
	Dyn. Drehmoment : 1,1 Nm (Beschl.)	Massenträgheitsmoment : 1,4 kgcm ²
	-0,3 Nm (Verzög.)	Spannung : 230 V
	Max. Drehmoment : 1,1 Nm	
	Jext : 111,5 kgcm ²	
	Motor	
	Id. Nr.	Gewicht
Ohne Bremse : 95802010SMH	5,6 kg	
Mit Bremse : 95802110SMH	6,3 kg	
Getriebe : PLN 90		
Motoradapter : -		
Kupplung : -		

Abbildung A.2: Auslegung Lineareinheit: X-Achse



SIEMENS

TIA Selection Tool

TIA Selection Tool Projekt X_Y_Achsen X Achse



1. Dimensioning documentation

Mechanisches System - Vorschubantrieb

Mechanikparameter		Bewegungsprofil-Parameter		Trägheitsverhältnis				
m_{alle}	Massen	v_{max}	300 mm/s	J_{ext}	Fremdträgheitsmoment			
D	Durchmesser des Antriebsrads	a_{max}	0.900 m/s ²	J_{int}	Eigenträgheitsmoment			
α	Neigungswinkel für die Nutzlast	t_{zyklus}	20.0 s	λ	Verhältnis (J_{ext} / J_{int})			
η_{mech}	Wirkungsgrad des mechanischen Systems			Transmission				
μ_{fr}	Reibungskoeffizient			i	J	η	M_{fr}	
				Name2 (motornah)	20.0	0.00 kg m ²	1.00	0.00 Nm

Motor: 1FL6034-2AF21-1LG1

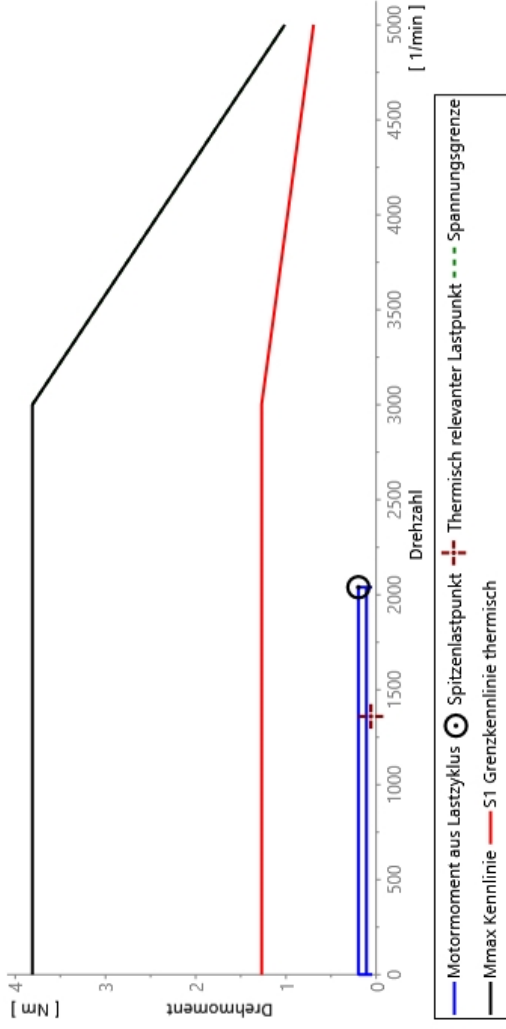
Power unit: 6SL3210-5FB10-4UF1, SINAMICS V90, 2.60 A / 0.400 kW



Motordaten	
$n_{rated} / M_{rated} / I_{rated}$	3000 1/min / 1.27 Nm / 2.60 A
Kühlart / Trägheitsklasse / IP Class	Selbstkühlung / Low Inertia / IPn.v.
Geber	Ja
Mit Bremse	Nein

Frequenzumrichterdaten		
Erforderlich	Verfügbar	Ausnutzung
Effektivstrom	2.60 A	4.66 %
Spitzenstrom	7.80 A	5.14 %
Bremswiderstand	Ja	

Motor properties



Motorbetriebspunkte		
Drehmoment	Drehzahl	Ausnutzung
+	1360 1/min	4.70 %
⊙	2040 1/min	5.18 %
Motor operational data		
Frequenz bei max. Drehzahl	136 Hz	
Feldschwächfaktor	0.680	
Motor клеммная напряжение	191 V	

2. Mechanik Vorschubantrieb



Mechanikparameter - Mechanik Vorschubantrieb

Massen

m_{payload}	Stetige Nutzlast	100 kg
m_{carriage}	Masse Schlitten	2.63 kg
m_{counter}	Gegengewicht	0.00 kg
F_{comp}	Gewichtskompensation	0.00 N

Trägheitsmomente

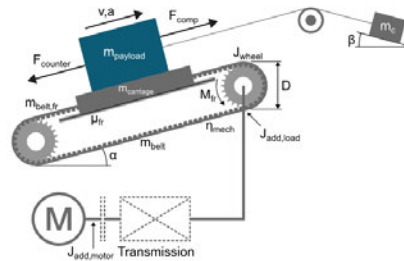
J_{wheel}	Trägheitsmoment eines Rads	0.00 kg m ²
N_{wheel}	Anzahl Räder	2.00
$J_{\text{add, load}}$	Zusatzträgheitsmoment bezogen auf Last	0.00 kg cm ²
$J_{\text{add, motor}}$	Zusatzträgheitsmoment bezogen auf Motor	0.00 kg m ²

Mechanik

D	Durchmesser des Antriebsrads	56.2 mm
α	Neigungswinkel für die Nutzlast	0.00 °
β	Neigungswinkel für das Gegengewicht	90.0 °

Reibung

m_{belt}	Riemenmasse	0.00 kg
$m_{\text{belt, fr}}$	Gurtmasse für Gleitreibung	0.00 kg
r_{sliding}	Riemenmassenverhältnis für Gleitreibung	0.900
M_{fr}	Reibmoment	0.900 Nm
F_{counter}	Zusätzliche Gegenkraft	0.00 N
η_{mech}	Wirkungsgrad des mechanischen Systems	1.00
μ_{fr}	Reibungskoeffizient	0.00



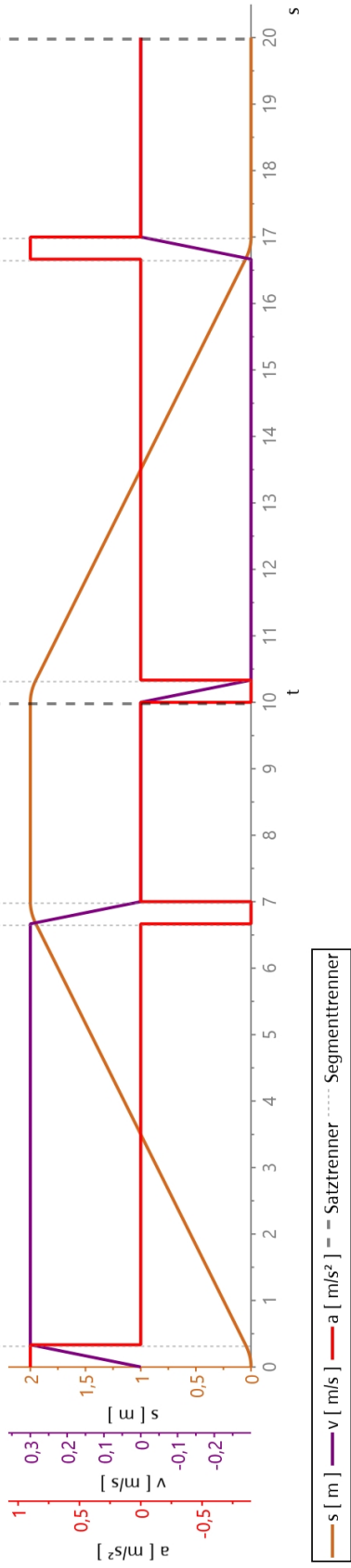
Transmission

Symbol		Lastnah	Motornah
	Typ	n.v.	Allgemeines Getriebe
	Bezeichnung	n.v.	Name2
i	Drehzahlverhältnis Eingang/Ausgang	n.v.	20.0
η	Wirkungsgrad	n.v.	1.00
M_{fr}	Reibmoment Eingang	n.v.	0.00 Nm
J	Trägheitsmoment	n.v.	0.00 kg m ²

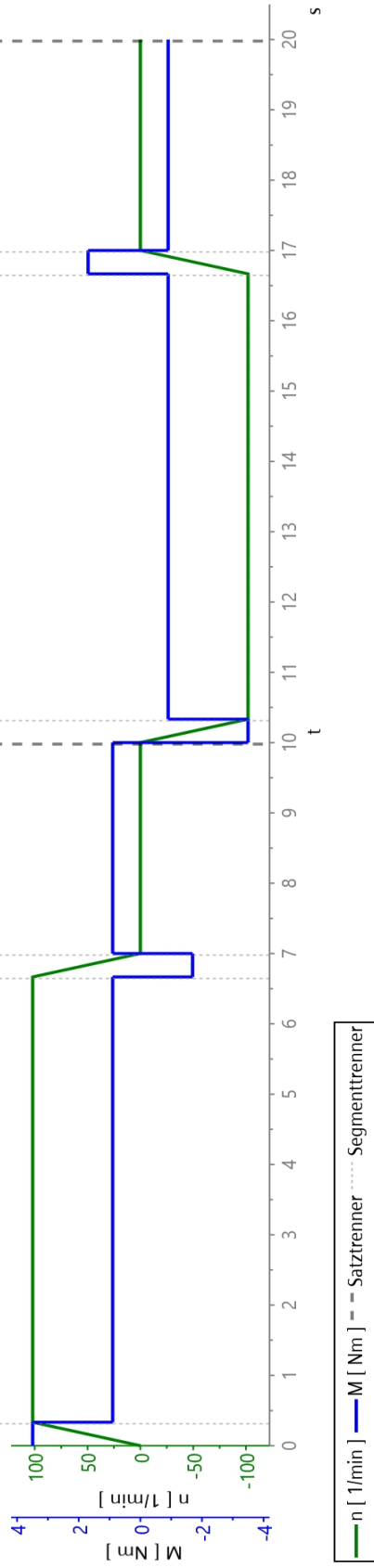


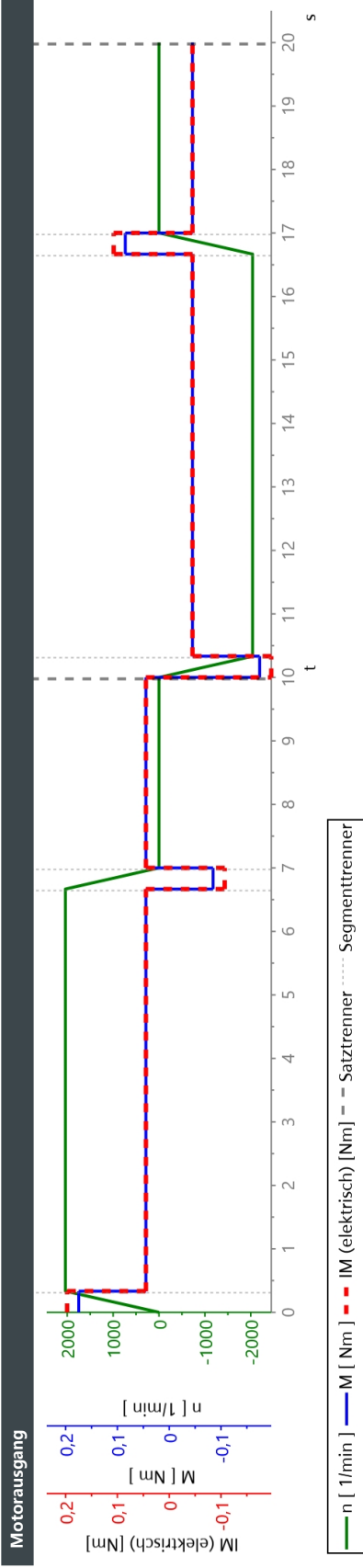
3. Bewegungsprofil

Bewegungsprofil Last



ausgang (= Mechanik Eingang)





Lastdaten

Symbol	Beschreibung	Einheit	Bewegung / Abschnitt							
Bewegungsprofil Last			1 / 1	1 / 2	1 / 3	1 / 4	2 / 1	2 / 2	2 / 3	2 / 4
	Richtung / Typ		+	+	+	Pause	-	-	-	Pause
s	Weg	mm	50.0	1900	50.0	0.00	50.0	1900	50.0	0.00
s	Position	m	0.0500	1.95	2.00	2.00	1.95	0.0500	0.00	0.00
v	Max. Geschwindigkeit / Endgeschwindigkeit	mm/s	300	300	300	0.00	300	300	300	0.00
a	Max. Beschleunigung	m/s ²	0.900	0.00	-0.900	0.00	-0.900	0.00	0.900	0.00
t	Dauer	s	0.333	6.33	0.333	3.00	0.333	6.33	0.333	3.00
	Kumulierte Zeit	s	0.333	6.67	7.00	10.0	10.3	16.7	17.0	20.0
ausgang (= Mechanik Eingang)										
n _{max}	Maximale Drehzahl	1/min	102	102	102	102	102	102	102	102
M _{stat}	Statisches Lastmoment	Nm	0.900	0.900	0.900	0.900	-0.900	-0.900	-0.900	-0.900
Name2 allgemeines getriebe ausgang										
n _{max}	Maximale Drehzahl	1/min	2040	2040	2040	0.00	2040	2040	2040	0.00
M _{stat}	Statisches Lastmoment	Nm	0.0450	0.0450	0.0450	0.0450	-0.0450	-0.0450	-0.0450	-0.0450
Motorausgang										
n _{max}	Maximale Drehzahl	1/min	2040	2040	2040	0.00	-2040	-2040	-2040	0.00
M _{stat}	Statisches Lastmoment	Nm	0.0450	0.0450	0.0450	0.0450	-0.0450	-0.0450	-0.0450	-0.0450
M _{mech}	Statisches + dynamisches Lastmoment ohne Jint	Nm	0.175	0.0450	-0.0848	0.0450	-0.175	-0.0450	0.0848	-0.0450
M _{el}	Statisches + dynamisches Lastmoment mit Jint	Nm	0.197	0.0450	-0.107	0.0450	-0.197	-0.0450	0.107	-0.0450
J _{ext}	Fremdträgheitsmoment	kg cm ²	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03	2.03
J _{int}	Eigenträgheitsmoment	kg cm ²	0.351	0.351	0.351	0.351	0.351	0.351	0.351	0.351
f _{op}	Minimale Betriebsfrequenz des Motors	Hz	136	136	136	0.00	-136	-136	-136	0.00



4. Motor

Motorparameter



SIMOTICS S - 1FL6, Servomotor - synchron, Low Inertia, Stillstands Drehmoment 1.27 Nm, Motorleistung 0.400 kW, Bemessungsdrehzahl 3000 1/min, Achshöhe 30.0 mm, Selbstkühlung

1FL6034-2AF21-1LG1

Motordaten

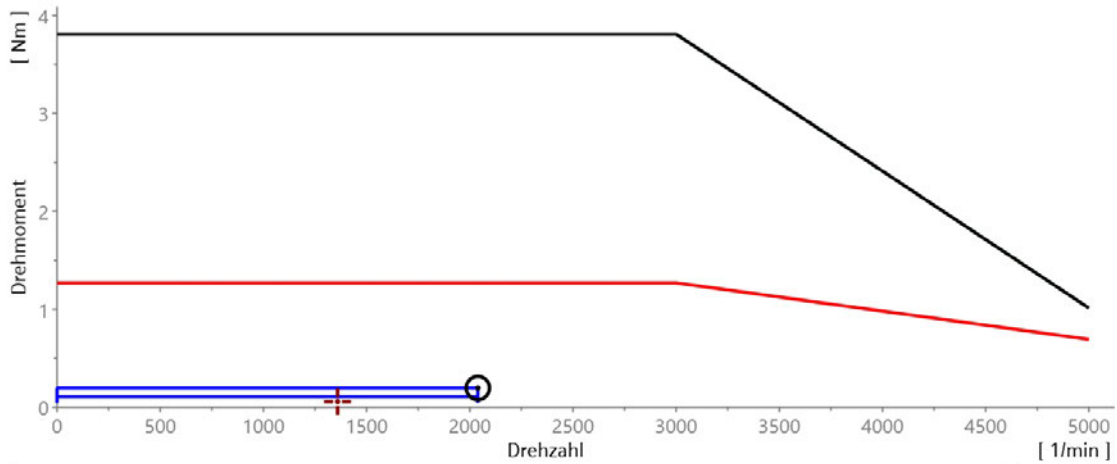
Bemessungsleistung	0.400 kW
Bemessungsdrehzahl	3000 1/min
Bemessungsdrehmoment	1.27 Nm
Bemessungsstrom	2.60 A
Max. Drehzahl	5000 1/min
Max. Moment	3.82 Nm
Max. Strom	7.80 A
Stillstands Drehmoment	1.27 Nm
Stillstandsstrom	2.58 A
Achshöhe	30.0 mm
Version	Low Inertia
Wicklungsspannung	n.v.
Motorfrequenz	50.0 Hz

Parameter konfigurieren

Motoroptionen

Wellenende	Glatte Welle	Farbe	Tiefschwarz (RAL 9005)
Gebersystem	Absolutwertgeber 20 bit + 12 bit Multiturn	Schutzart IP	IP65
Anschlusstyp	Kabelabgang	Bauform	IM B5 (IM V1, IM V3)
Haltebremse	False	Schweregrad der Vibration	A

Motoreigenschaften



— Motormoment aus Lastzyklus ⊙ Spitzenlastpunkt + Thermisch relevanter Lastpunkt - - - Spannungsgrenze
— Mmax Kennlinie — S1 Grenzkennlinie thermisch

Spitzenlastpunkt des Motors

	erforderlich	verfügbar	Ausnutzung
Max. Moment	0.197 Nm	3.81 Nm	5.18 %
bei Drehzahl	2040 1/min		

Thermisch relevanter Lastpunkt des Motors

	erforderlich	verfügbar	Ausnutzung
Drehmoment	0.0597 Nm	1.27 Nm	4.70 %
bei Drehzahl	1360 1/min		

Ausnutzung Motor

	Ist	Grenzwert	Einheit	
Thermische Ausnutzung	4.70	100	%	✓
Ausnutzung max. Moment	5.18	100	%	✓
Max. mechanisches Moment	0.197	3.82	Nm	✓
Effektivstrom	0.121	7.80	A	✓
Max. Strom	0.401	7.80	A	✓
Maximale Drehzahl	2040	5000	1/min	✓
Trägheitsverhältnis	5.77	7.00		✓

Trägheitsverhältnis

J_{ext}	Fremdträgheitsmoment	2.03 kg cm ²
J_{int}	Eigentragheitsmoment	0.351 kg cm ²
λ	Verhältnis (J_{ext} / J_{int})	5.77

Drehzahl

Frequenz bei min. Drehzahl	0.00 Hz
Frequenz bei max. Drehzahl	136 Hz
Feldschwächfaktor	0.680

5. Frequenzumrichter



Parameter des Frequenzumrichters

Typbeschreibung:

SINAMICS V90, Einzelachse, Compact, Bemessungsleistung 0.400 kW

Artikelnummer(n):

Control Unit &
Power Module: **6SL3210-5FB10-4UF1**

Frequenzumrichterdaten

Netzdaten	1AC 200 - 240 V
Bemessungsleistung	0.400 kW
Max. Strom	7.80 A
Bemessungsstrom	2.60 A

Ausnutzung Frequenzumrichter

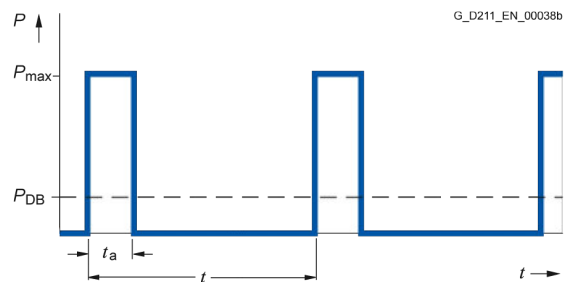
	Ist	Grenzwert	Einheit	
Dauerstromausnutzung	4.66	100	%	✓
Ausnutzung max. Strom	5.14	100	%	✓
Ausgangsfrequenz	136	330 Hz	Hz	✓
Pulsfrequenz	4.00	4.00 - 4.00	kHz	✓
Frequenzumrichter ist rückspeisefähig	Nein			
Generatorischer Betrieb	Nein			

Daten Bremswiderstand

Ohmscher Widerstand	100 Ohm
Lastdauer (ta)	500 ms
Zykluszeit des Bremswiderstands (t)	40.0 s

Eignung des Bremswiderstands

	Ist	Grenzwert	Einheit	
Lastzyklusdauer	20.0		s	
Generatorische Einschaltdauer Last	0.00	100	%	
Mittlere generatorische Leistung Last	0.00		kW	
Max. Bremsleistung (P_max)	0.00	1.64	kW	?
Mittlere Bremsleistung (P_DB)	0.00	0.0205	kW	?
Energieausnutzung Bremswiderstand	0.00	100	%	?



Parameter konfigurieren

Allgemein

Schutzart IP20

Kommunikation

Kommunikation PROFINET

Ergänzende Systemkomponenten

SD-Speicherkarte ohne

DC Link			
Bremswiderstand	integriert		
Netzseitige Leistungskomponenten			
Leistungsschalter	True	EMV Kategorie (externer Filter)	ohne
Sicherung	False		



6. Dimensioning documentation

Mechanisches System - Vorschubantrieb

Mechanikparameter		Bewegungsprofil-Parameter		Trägheitsverhältnis				
m_{alle}	Massen	v_{max}	300 mm/s	J_{ext}	Fremdträgheitsmoment			
D	Durchmesser des Antriebsrads	a_{max}	0.900 m/s ²	J_{int}	Eigenträgheitsmoment			
α	Neigungswinkel für die Nutzlast	t_{zyklus}	16.7 s	λ	Verhältnis (J_{ext} / J_{int})			
η_{mech}	Wirkungsgrad des mechanischen Systems			Transmission				
μ_{fr}	Reibungskoeffizient			i	J	η	M_{fr}	
				Name2 (motornah)	20.0	0.00 kg m ²	1.00	0.00 Nm

Motor: 1FL6034-2AF21-1LG1

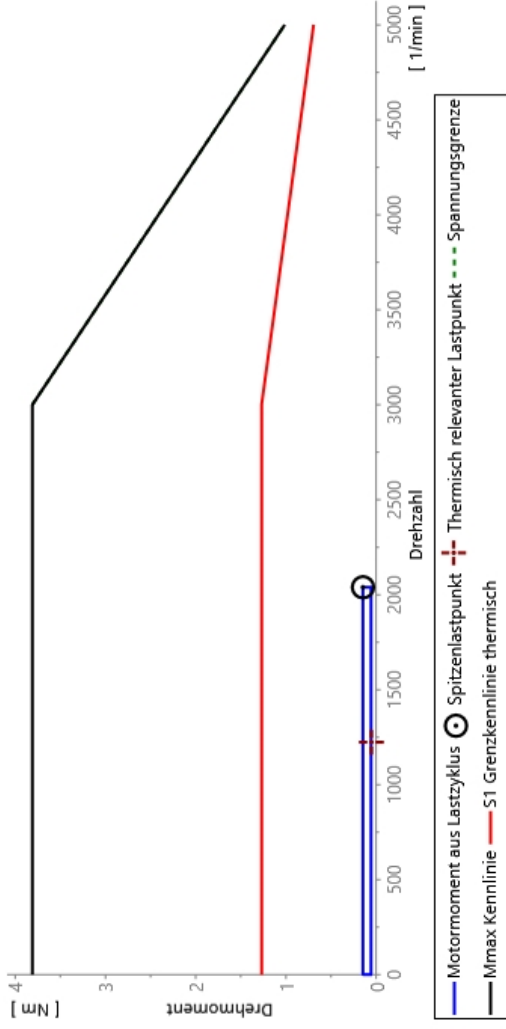
Power unit: 6SL3210-5FB10-4UF1, SINAMICS V90, 2.60 A / 0.400 kW



Motordaten	
$n_{rated} / M_{rated} / I_{rated}$	3000 1/min / 1.27 Nm / 2.60 A
Kühlart / Trägheitsklasse / IP Class	Selbstkühlung / Low Inertia / IPn.v.
Geber	Ja
Mit Bremse	Nein

Frequenzumrichterdaten		
Erforderlich	Verfügbar	Ausnutzung
Effektivstrom	2.60 A	4.17 %
Spitzenstrom	7.80 A	3.82 %
Bremswiderstand	Ja	

Motor properties



Motorbetriebspunkte			
	Drehmoment	Drehzahl	Ausnutzung
+	0.0534 Nm	1220 1/min	4.20 %
⊙	0.147 Nm	2040 1/min	3.85 %
Motor operational data			
	Frequenz bei max. Drehzahl	136 Hz	
	Feldschwächfaktor	0.680	
	Motor клеммная напряжение	191 V	

7. Mechanik Vorschubantrieb



Mechanikparameter - Mechanik Vorschubantrieb

Massen

$m_{payload}$	Stetige Nutzlast	60.0 kg
$m_{carriage}$	Masse Schlitten	2.63 kg
$m_{counter}$	Gegengewicht	0.00 kg
F_{comp}	Gewichtskompensation	0.00 N

Trägheitsmomente

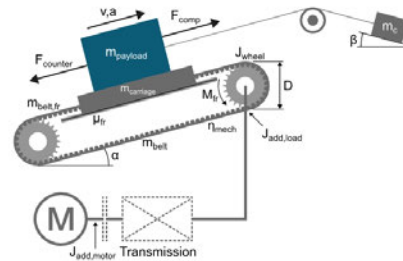
J_{wheel}	Trägheitsmoment eines Rads	0.00 kg m ²
N_{wheel}	Anzahl Räder	2.00
$J_{add,load}$	Zusatzträgheitsmoment bezogen auf Last	0.00 kg cm ²
$J_{add,motor}$	Zusatzträgheitsmoment bezogen auf Motor	0.00 kg m ²

Mechanik

D	Durchmesser des Antriebsrads	56.2 mm
α	Neigungswinkel für die Nutzlast	0.00 °
β	Neigungswinkel für das Gegengewicht	90.0 °

Reibung

m_{belt}	Riemenmasse	0.00 kg
$m_{belt,fr}$	Gurtmasse für Gleitreibung	0.00 kg
$r_{sliding}$	Riemenmassenverhältnis für Gleitreibung	0.900
M_{fr}	Reibmoment	0.900 Nm
$F_{counter}$	Zusätzliche Gegenkraft	0.00 N
η_{mech}	Wirkungsgrad des mechanischen Systems	1.00
μ_{fr}	Reibungskoeffizient	0.00



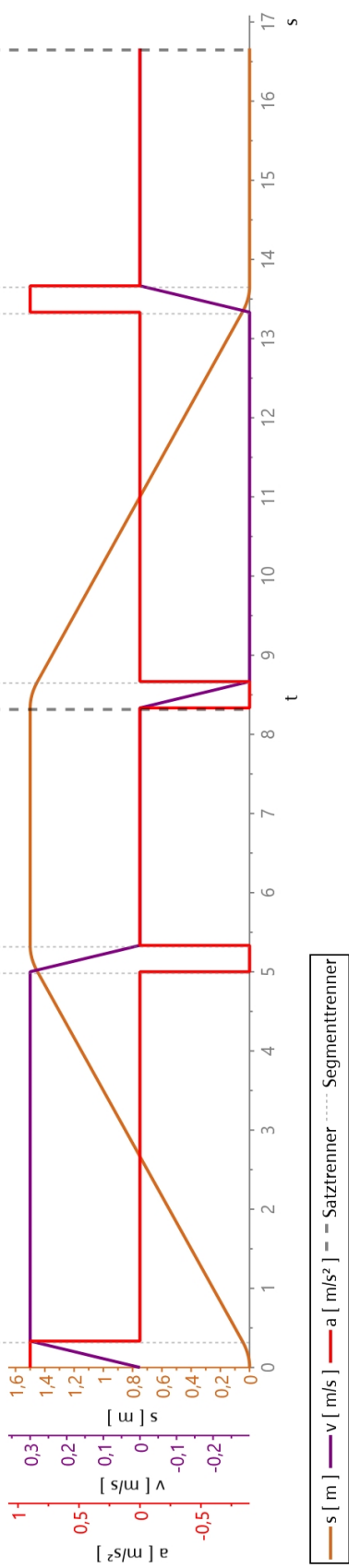
Transmission

Symbol		Lastnah	Motornah
	Typ	n.v.	Allgemeines Getriebe
	Bezeichnung	n.v.	Name2
i	Drehzahlverhältnis Eingang/Ausgang	n.v.	20.0
η	Wirkungsgrad	n.v.	1.00
M_{fr}	Reibmoment Eingang	n.v.	0.00 Nm
J	Trägheitsmoment	n.v.	0.00 kg m ²

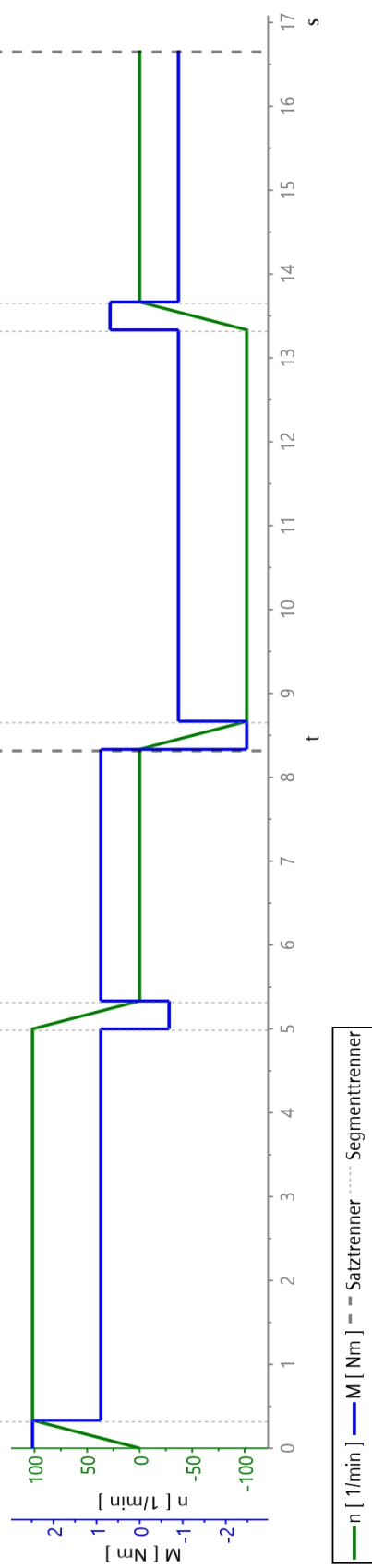


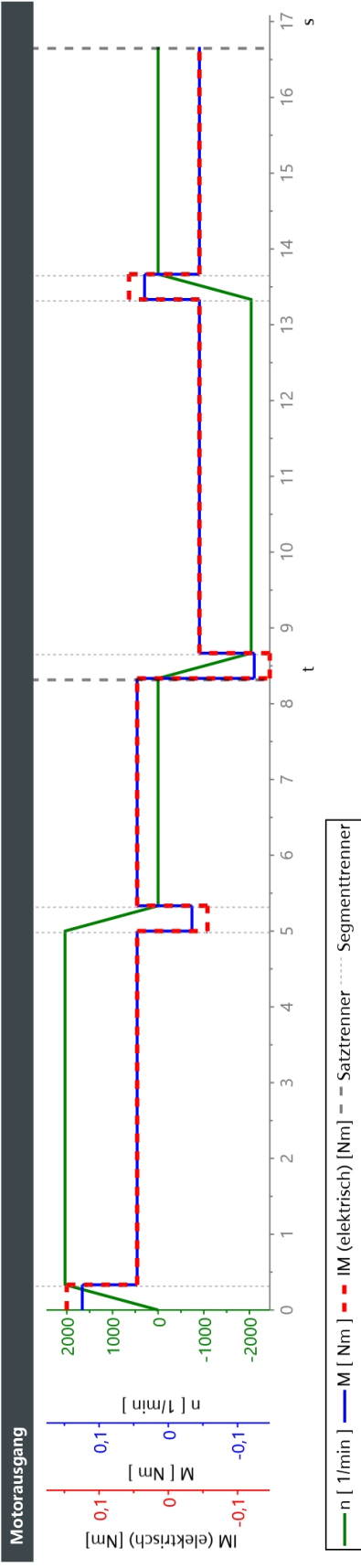
8. Bewegungsprofil

Bewegungsprofil Last



ausgang (= Mechanik Eingang)





Lastdaten

Symbo l	Beschreibung	Einheit	Bewegung / Abschnitt							
			1 / 1	1 / 2	1 / 3	1 / 4	2 / 1	2 / 2	2 / 3	2 / 4
Bewegungsprofil Last										
	Richtung / Typ		+	+	+	Pause	-	-	-	Pause
s	Weg	mm	50.0	1400	50.0	0.00	50.0	1400	50.0	0.00
s	Position	m	0.0500	1.45	1.50	1.50	1.45	0.0500	0.00	0.00
v	Max. Geschwindigkeit / Endgeschwindigkeit	mm/s	300	300	300	0.00	300	300	300	0.00
a	Max. Beschleunigung	m/s ²	0.900	0.00	-0.900	0.00	-0.900	0.00	0.900	0.00
t	Dauer	s	0.333	4.67	0.333	3.00	0.333	4.67	0.333	3.00
	Kumulierte Zeit	s	0.333	5.00	5.33	8.33	8.67	13.3	13.7	16.7
ausgang (= Mechanik Eingang)										
n _{max}	Maximale Drehzahl	1/min	102	102	102	102	102	102	102	102
M _{stat}	Statisches Lastmoment	Nm	0.900	0.900	0.900	0.900	-0.900	-0.900	-0.900	-0.900
Name2 allgemeines getriebe ausgang										
n _{max}	Maximale Drehzahl	1/min	2040	2040	2040	0.00	2040	2040	2040	0.00
M _{stat}	Statisches Lastmoment	Nm	0.0450	0.0450	0.0450	0.0450	-0.0450	-0.0450	-0.0450	-0.0450
Motorausgang										
n _{max}	Maximale Drehzahl	1/min	2040	2040	2040	0.00	-2040	-2040	-2040	0.00
M _{stat}	Statisches Lastmoment	Nm	0.0450	0.0450	0.0450	0.0450	-0.0450	-0.0450	-0.0450	-0.0450
M _{mech}	Statisches + dynamisches Lastmoment ohne Jint	Nm	0.124	0.0450	-0.0342	0.0450	-0.124	-0.0450	0.0342	-0.0450
M _{el}	Statisches + dynamisches Lastmoment mit Jint	Nm	0.147	0.0450	-0.0567	0.0450	-0.147	-0.0450	0.0567	-0.0450
J _{ext}	Fremdträgheitsmoment	kg cm ²	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24	1.24
J _{int}	Eigenträgheitsmoment	kg cm ²	0.351	0.351	0.351	0.351	0.351	0.351	0.351	0.351
f _{op}	Minimale Betriebsfrequenz des Motors	Hz	136	136	136	0.00	-136	-136	-136	0.00



Motorparameter



SIMOTICS S - 1FL6, Servomotor - synchron, Low Inertia, Stillstands Drehmoment 1.27 Nm, Motorleistung 0.400 kW, Bemessungsdrehzahl 3000 1/min, Achshöhe 30.0 mm, Selbstkühlung

1FL6034-2AF21-1LG1

Motordaten

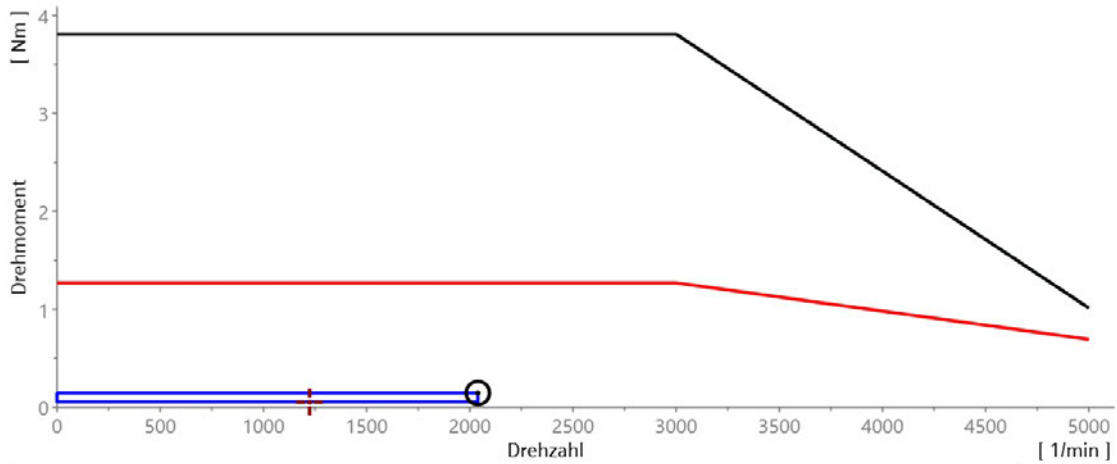
Bemessungsleistung	0.400 kW
Bemessungsdrehzahl	3000 1/min
Bemessungsdrehmoment	1.27 Nm
Bemessungsstrom	2.60 A
Max. Drehzahl	5000 1/min
Max. Moment	3.82 Nm
Max. Strom	7.80 A
Stillstands Drehmoment	1.27 Nm
Stillstandsstrom	2.58 A
Achshöhe	30.0 mm
Version	Low Inertia
Wicklungsspannung	n.v.
Motorfrequenz	50.0 Hz

Parameter konfigurieren

Motoroptionen

Wellenende	Glatte Welle	Farbe	Tiefschwarz (RAL 9005)
Gebersystem	Absolutwertgeber 20 bit + 12 bit Multiturn	Schutzart IP	IP65
Anschlusstyp	Kabelabgang	Bauform	IM B5 (IM V1, IM V3)
Haltebremse	False	Schweregrad der Vibration	A

Motoreigenschaften



— Motormoment aus Lastzyklus
 ⊙ Spitzenlastpunkt
 + Thermisch relevanter Lastpunkt
 - - - Spannungsgrenze
— Mmax Kennlinie
 — S1 Grenzkennlinie thermisch

Spitzenlastpunkt des Motors

	erforderlich	verfügbar	Ausnutzung
Max. Moment	0.147 Nm	3.81 Nm	3.85 %
bei Drehzahl	2040 1/min		

Thermisch relevanter Lastpunkt des Motors

	erforderlich	verfügbar	Ausnutzung
Drehmoment	0.0534 Nm	1.27 Nm	4.20 %
bei Drehzahl	1220 1/min		

Ausnutzung Motor

	Ist	Grenzwert	Einheit	
Thermische Ausnutzung	4.20	100	%	✓
Ausnutzung max. Moment	3.85	100	%	✓
Max. mechanisches Moment	0.147	3.82	Nm	✓
Effektivstrom	0.108	7.80	A	✓
Max. Strom	0.298	7.80	A	✓
Maximale Drehzahl	2040	5000	1/min	✓
Trägheitsverhältnis	3.52	7.00		✓

Trägheitsverhältnis

J_{ext}	Fremdträgheitsmoment	1.24 kg cm ²
J_{int}	Eigentragheitsmoment	0.351 kg cm ²
λ	Verhältnis (J_{ext} / J_{int})	3.52

Drehzahl

Frequenz bei min. Drehzahl	0.00 Hz
Frequenz bei max. Drehzahl	136 Hz
Feldschwächfaktor	0.680

10. Frequenzumrichter



Parameter des Frequenzumrichters

Typbeschreibung:

SINAMICS V90, Einzelachse, Compact, Bemessungsleistung 0.400 kW

Artikelnummer(n):

Control Unit &
Power Module: **6SL3210-5FB10-4UF1**

Frequenzumrichterdaten

Netzdaten	1AC 200 - 240 V
Bemessungsleistung	0.400 kW
Max. Strom	7.80 A
Bemessungsstrom	2.60 A

Ausnutzung Frequenzumrichter

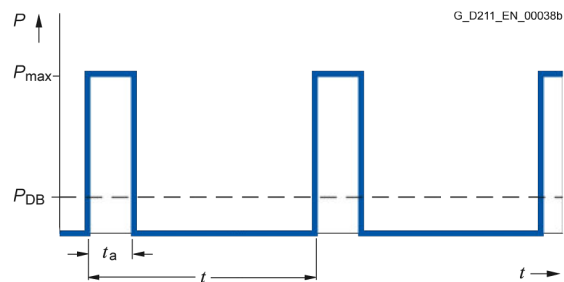
	Ist	Grenzwert	Einheit	
Dauerstromausnutzung	4.17	100	%	✓
Ausnutzung max. Strom	3.82	100	%	✓
Ausgangsfrequenz	136	330 Hz	Hz	✓
Pulsfrequenz	4.00	4.00 - 4.00	kHz	✓
Frequenzumrichter ist rückspeisefähig	Nein			
Generatorischer Betrieb	Nein			

Daten Bremswiderstand

Ohmscher Widerstand	100 Ohm
Lastdauer (ta)	500 ms
Zykluszeit des Bremswiderstands (t)	40.0 s

Eignung des Bremswiderstands

	Ist	Grenzwert	Einheit	
Lastzyklusdauer	16.7		s	
Generatorische Einschaltdauer Last	0.00	100	%	
Mittlere generatorische Leistung Last	0.00		kW	
Max. Bremsleistung (P_max)	0.00	1.64	kW	?
Mittlere Bremsleistung (P_DB)	0.00	0.0205	kW	?
Energieausnutzung Bremswiderstand	0.00	100	%	?



Parameter konfigurieren

Allgemein	
Schutzart	IP20
Kommunikation	
Kommunikation	PROFINET
Ergänzende Systemkomponenten	
SD-Speicherkarte	ohne

DC Link			
Bremswiderstand	integriert		
Netzseitige Leistungskomponenten			
Leistungsschalter	True	EMV Kategorie (externer Filter)	ohne
Sicherung	False		

11. Bestellliste

Artikelnummer	Bezeichnung	Anzahl konfiguriert	Bestellmenge	Einzelteile
1FL6034-2AF21-1LG1	SIMOTICS S - 1FL6, Servomotor - synchron, Low Inertia, Stillstandsrehmoment 1.27 Nm, Motorleistung 0.400 kW, Bemessungsdrehzahl 3000 1/min, Achshöhe 30.0 mm, Selbstkühlung	2	2 Stück	2
3RV2011-1HA10	Leistungsschalter Baugröße S00 für den Motorschutz, CLASS 10 A-Auslöser 5,5...8 A N-Auslöser 104 A Schraubanschluss Standardschaltvermögen	2	2 Stück	2
6FX3002-5CK01-1AF0	MOTION-CONNECT 300 Leistungsleitung, konfektioniert: 5.00 m	2	2 Stück	2
6SL3210-5FB10-4UF1	SINAMICS V90, Einzelachse, Compact, Bemessungsleistung 0.400 kW	2	2 Stück	2

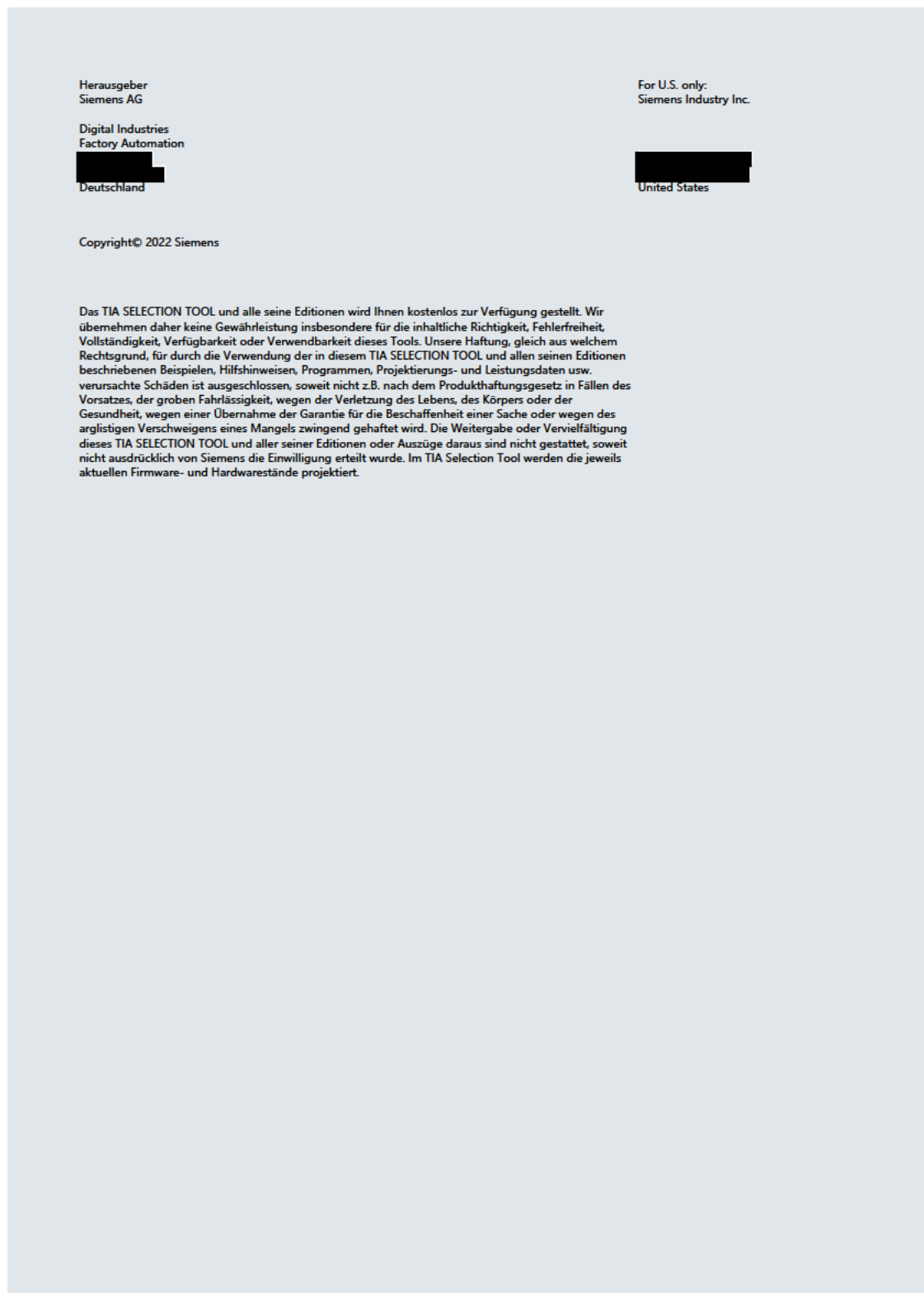


Abbildung A.3: Auslegung Motorsteuerung

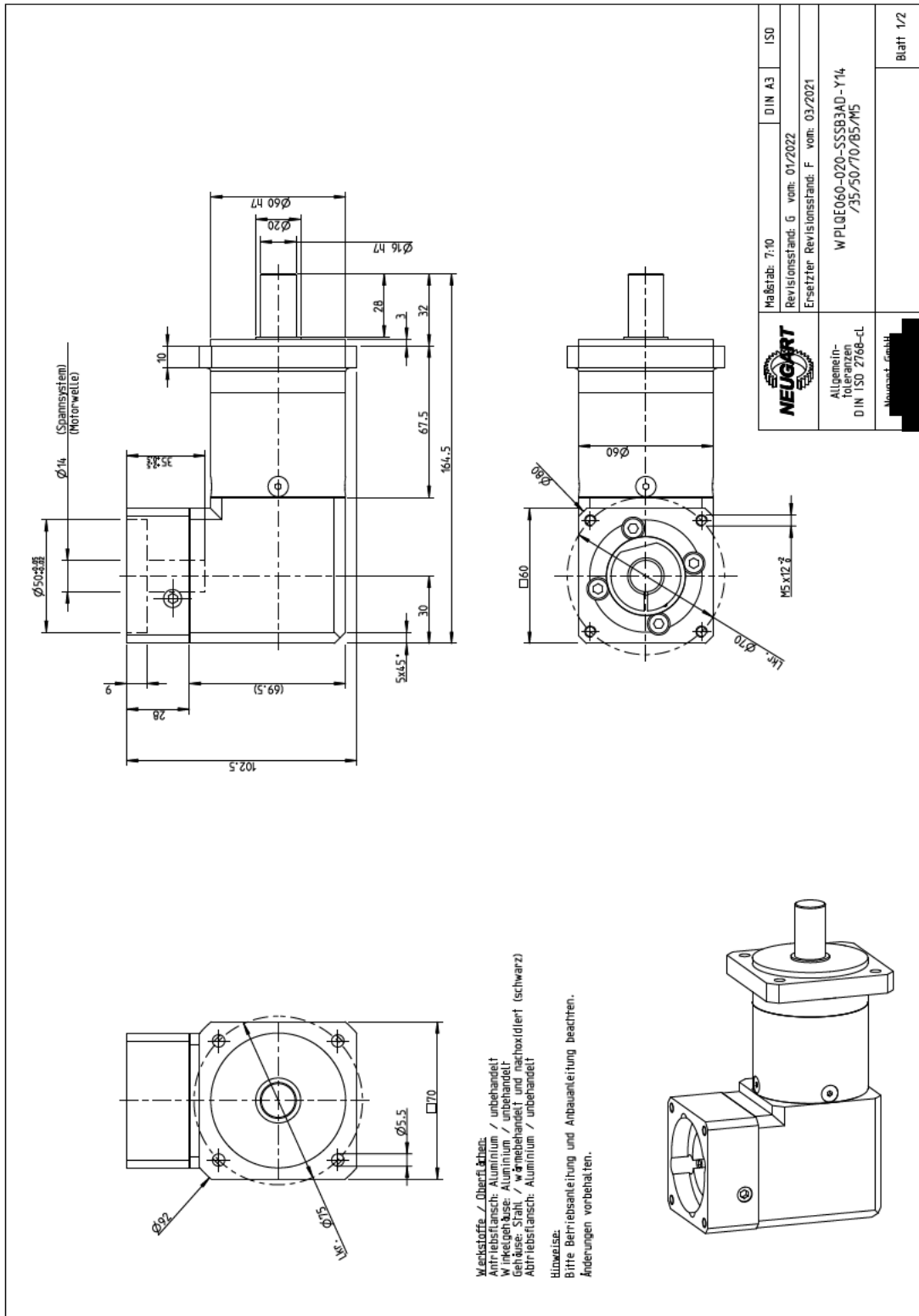


Abbildung A.4: Auswahl Getriebe

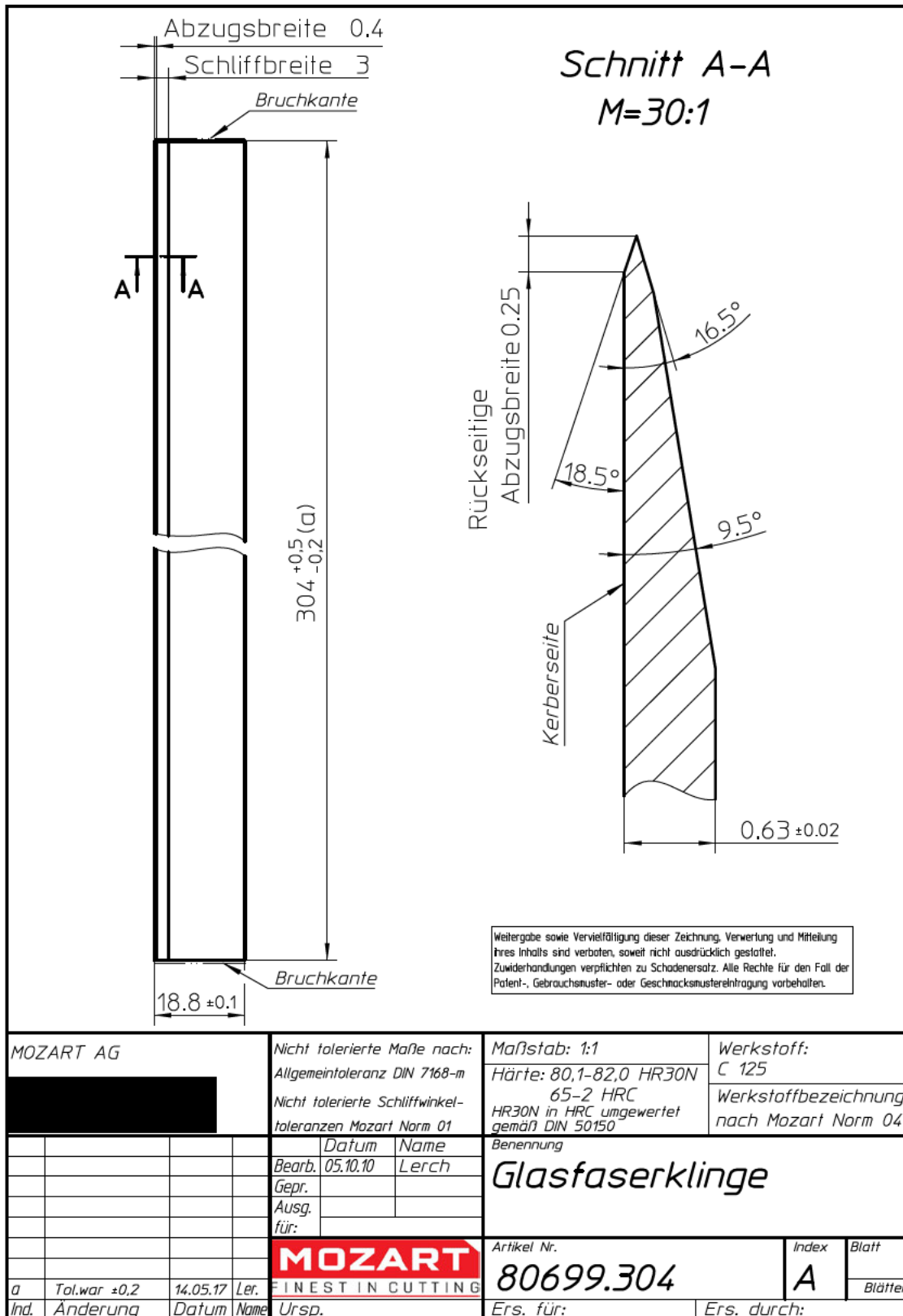


Abbildung A.5: Glasfaserklinge

PRODUCT DATA SHEET

DESCRIPTION

Toray EX-1515 cyanate ester prepreg resin system is unique in the industry in that it is able to achieve an extremely high level of cure conversion after a 121°C (250°F) cure. This level of conversion provides optimal mechanical properties, high radiation resistance, low moisture absorption, and low outgassing while retaining unparalleled toughness, a low 118°C (244°F), stress-free temperature, and long out time. The resin system excels in its ability to resist microcracking, even when subjected to thermal cycling and high levels of radiation exposure. EX-1515 also displays low dielectric and low loss values which makes it outstanding for radome and antenna applications. EX-1515 can be post cured, freestanding, to increase thermal performance for temperature-critical structures.

FEATURES

- ▶ High radiation resistance
- ▶ Low microcracking even under severe thermocycling
- ▶ Low moisture absorption
- ▶ Low dielectric constant and dissipation factors
- ▶ Low stress-free cure temperature with high level of cure
- ▶ Outstanding mechanical properties
- ▶ Compatible adhesive is EX-1516

PRODUCT TYPE

107–121°C (225–250°F) Cure Toughened Cyanate Ester

TYPICAL APPLICATIONS

- ▶ High dimensional stability space structures
- ▶ Optical benches
- ▶ Reflectors
- ▶ Radomes and antennas
- ▶ Low observable structures

SHELF LIFE

Out Life:	21 days at ≤ 21°C (70°F) and ≤ 60% RH
Frozen Storage Life:	12 months at -18°C (< 0°F) or below

Out life is the maximum time allowed at ≤ 21°C (70°F) and ≤ 60% RH before cure.**

** Out life tested via prepreg tack and drape, and ILSS on 24 ply 7781 fabric laminate cured at 121°C (250°F) under 85 psig pressure for 3 hours.

TYPICAL NEAT RESIN PROPERTIES

Density	1.156 g/cc
T _g (by DMA)	121°C (249°F) cured at 121°C (250°F) 174°C (345°F) post cured at 177°C (350°F)
Moisture Absorption	0.04%, P75 laminate saturation at 27°C (80°F), and 85% relative humidity
Outgassing (TML*)	0.18%
Outgassing (CVCM*)	0.01%
CTE	61 ppm/°C (34 ppm/°F)
Thermal Conductivity	0.169 W/m*K
Dielectric Constant	2.8 (at 10 GHz)
Loss Tangent	0.004 (at 10 GHz)

*TML: Total Mass Loss

*CVCM: Collected Volatile Condensable Materials

SERVICE TEMPERATURE

100°C (212°F) without post cure
154°C (310°F) with post cure



Contact us for more information:
North America/Asia/Pacific

Europe/Middle East/Africa

PRODUCT DATA SHEET

LAMINATE ELECTRICAL PROPERTIES ON 4581 AQIII QUARTZ

Property	X Band	Ku/K Band	Ka Band	W Band
	8–12.6 GHz	18–26.5 GHz	33–50 GHz	75–100 GHz
Dielectric Constant	3.32	3.30	3.30	3.30
Loss Tangent	0.004	0.004	0.005	0.006

LAMINATE DATA - 4581 AQIII/EX-1515 8HS WOVEN FABRIC REINFORCEMENT, 300gsm FAW

Property	Condition	Method	Results	
Tensile Strength 0°	RTD	ASTM D 3039	757 MPa	109.8 ksi
Tensile Modulus 0°	RTD	ASTM D 3039	24 GPa	3.5 Msi
Compressive Strength 0°	RTD	ASTM D 6641	543 MPa	79 ksi
Compressive Modulus 0°	RTD	ASTM D 6641	28.8 GPa	4.06 Msi
Flexural Strength 0°	RTD	ASTM D 7264	738 MPa	107 ksi
Flexural Modulus 0°	RTD	ASTM D 7264	21.8 GPa	3.16 Msi
ILSS 0°	RTD	ASTM D 2344	68.0 MPa	9.9 ksi

Normalized to 55% fiber volume.

LAMINATE DATA - 7781 FIBERGLASS/EX-1515 8HS LAMINATE, 300gsm FAW

Property	Condition	Method	Results	
Tensile Strength 0°	RTD	ASTM D 3039	424 MPa	62 ksi
Tensile Modulus 0°	RTD	ASTM D 3039	25.2 GPa	3.65 Msi
Compressive Strength 0°	RTD	ASTM D 6641	393 MPa	57 ksi
Compressive Modulus 0°	RTD	ASTM D 6641	25.5 GPa	3.7 Msi
Flexural Strength 0°	RTD	ASTM D 7264	490 MPa	71 ksi
Flexural Modulus 0°	RTD	ASTM D 7264	21.7 GPa	3.15 Msi
ILSS 0°	RTD	ASTM D 2344	46.2 MPa	6.7 ksi

Normalized to 55% fiber volume.

LAMINATE DATA - TORAY M55J (78 Msi/538 GPa) PAN GRAPHITE/EX-1515

Property	Condition	Method	Results	
Tensile Strength**	RTD	ASTM D 3039	607 MPa	88 ksi
Tensile Modulus**	RTD	ASTM D 3039	100.7 GPa	14.6 Msi
Compressive Strength**	RTD	ASTM D 6641	317 MPa	46 ksi
Compressive Modulus**	RTD	ASTM D 6641	91.7 GPa	13.3 Msi
In-Plane Shear Strength**	RTD	ASTM D 7264	166 MPa	24 ksi

**Normalized to 60% fiber volume. Lay-up Configuration: 0°, 45°, 90°, 135° symmetrical

PRODUCT DATA SHEET

LAMINATE DATA - 4503 AQIII/EX-1515 38" WOVEN FABRIC REINFORCEMENT Continued from page 2

Property	Condition	Method	Results	
Tensile Strength 0°	RTD	ASTM D 3039	703 MPa	102 ksi
Tensile Modulus 0°	RTD	ASTM D 3039	26.2 GPa	3.8 Msi
Compressive Strength 0°	RTD	ASTM D 6641	537.8 MPa	78 ksi
Compressive Modulus 0°	RTD	ASTM D 6641	28.3 GPa	4.1 Msi
Flexural Strength 0°	RTD	ASTM D 7264	681.4 MPa	98.8 ksi
Flexural Modulus 0°	RTD	ASTM D 7264	23.8 GPa	3.45 Msi
Short Beam Shear Strength	RTD	ASTM D 2344	74.5 MPa	10.81 ksi

Normalized to 55% fiber volume.

LAMINATE DATA - TORAY M55J (78 Msi/538 GPa) PAN GRAPHITE/EX-1515

Property	Condition	Method	Results	
Tensile Strength 0°	RTD	ASTM D 3039	1896 MPa	275 ksi
Tensile Modulus 0°	RTD	ASTM D 3039	354 GPa	50 Msi
Compressive Strength 0°	RTD	ASTM D 6641	731 MPa	106 ksi
Compressive Modulus 0°	RTD	ASTM D 6641	310 GPa	45 Msi
Flexural Strength 0°	RTD	ASTM D 7264	1089 MPa	158 ksi
Flexural Modulus 0°	RTD	ASTM D 7264	317 GPa	46 Msi
Interlaminar Shear Strength	RTD	ASTM D 2344	62 MPa	9 ksi

Standard 121°C (250°F) Autoclave cure 85 psi, normalized to 60% fiber volume.

LAMINATE DATA - LMR 120 KEVLAR 49 PW PT/EX-1515 LAMINATE

Property	Condition	Method	Results	
Tensile Strength 0°	RTD	ASTM D 3039	558 MPa	81 ksi
Tensile Modulus 0°	RTD	ASTM D 3039	36.5 GPa	5.3 Msi
Compressive Strength 0°	RTD	ASTM D 695	203 MPa	29.5 ksi
Compressive Modulus 0°	RTD	ASTM D 695	32 GPa	4.7 Msi
Flexural Strength 0°	RTD	ASTM D 7264	517 MPa	75 ksi
Flexural Modulus 0°	RTD	ASTM D 7264	20 GPa	2.9 Msi
Interlaminar Shear Strength	RTD	ASTM D 2344	42 MPa	6.1 ksi

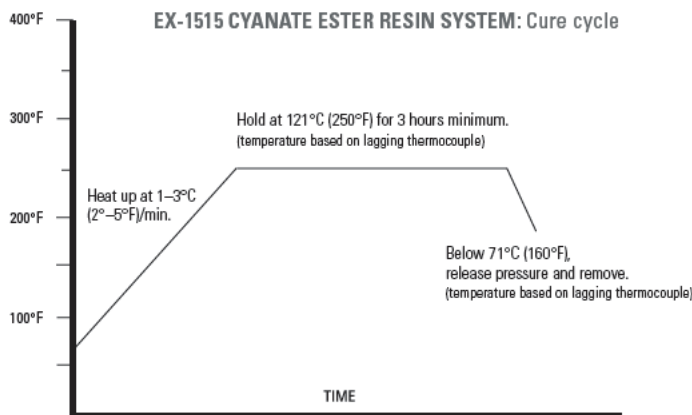
PRODUCT DATA SHEET

LAMINATE DATA - LMR 285 KEVLAR 49 PT/EX-1515 LAMINATE

Continued from page 3

Property	Condition	Method	Results	
Compressive Strength 0°	RTD	ASTM D 6641	193 MPa	28 ksi
Compressive Modulus 0°	RTD	ASTM D 6641	33.1 GPa	4.8 Msi
Compressive Strength 0°	ETD	ASTM D 6641	179 MPa	26 ksi
Compressive Modulus 0°	ETD	ASTM D 6641	31.0 GPa	4.5 Msi
Compressive Strength 0°	ETW	ASTM D 6641	124 MPa	18 ksi
Compressive Modulus 0°	ETW	ASTM D 6641	31.0 GPa	4.5 Msi
Flexural Strength 0°	RTD	ASTM D 7264	414 MPa	60 ksi
Flexural Modulus 0°	RTD	ASTM D 7264	20.7 GPa	3 Msi
Flexural Strength 0°	ETD	ASTM D 7264	393 MPa	57 ksi
Flexural Modulus 0°	ETD	ASTM D 7264	19.3 GPa	2.8 Msi
Flexural Strength 0°	ETW	ASTM D 7264	338 MPa	49 ksi
Flexural Modulus 0°	ETW	ASTM D 7264	15.9 GPa	2.3 Msi
In-Plane Shear Strength	RTD	ASTM D 2344	38.6 MPa	5.6 ksi
In-Plane Shear Strength	ETD	ASTM D 2344	37.2 MPa	5.4 ksi
In-Plane Shear Strength	ETW	ASTM D 2344	32.4 MPa	4.7 ksi

- ETD is 70°C (158°F)
 - ETW is 70°C (158°F) after 2 hr boil.
 - Standard cure: 121°C (250°F), 85 psi.
 - Normalized to 50% fiber volume.



- Apply 25 inHg vacuum minimum.
- Apply 40–100 psig pressure to autoclave (optional).

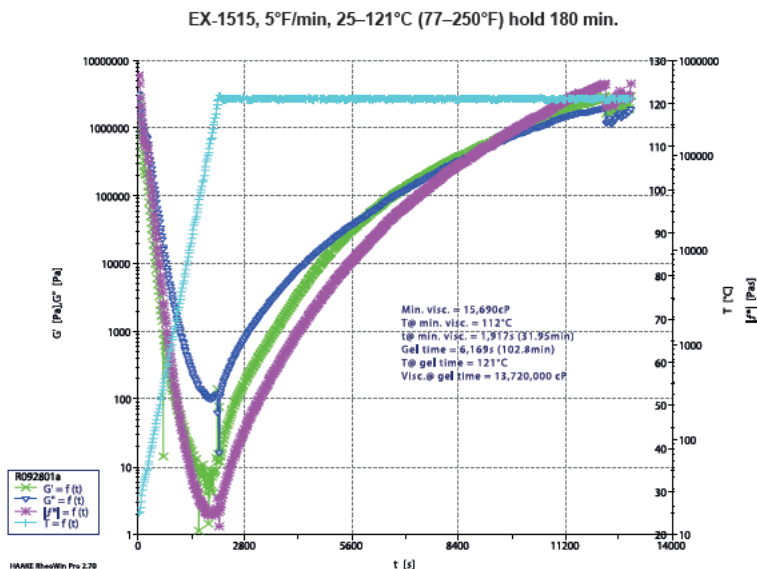
WARNING: The following statement does not apply to Spectra fabrics

Note: To improve the thermal capability of EX-1515, the material may be post cured freestanding.

Post cure: Heat at 1°C–3°C (2°F–5°F)/min. to 177°C (350°F), dwell at 177°C ± 6°C (350°F ± 10°F) for 2 hours minimum, cool at 3°C–6°C (5°F–10°F) to 71°C (160°F), then remove.

This cure cycle is to be used as a guideline by users because the part that they will produce may have different properties requirements than those laminates for which this cure cycle was determined.

PRODUCT DATA SHEET



CYANATE ESTER PREPREG, ADHESIVE, AND RESIN GUIDELINES AND HANDLING PROCEDURES

The following guidelines are provided to our customers for one specific purpose: to assure that all customers are aware of the manner by which to attain the best possible results from Toray Advanced Composites cyanate ester products. These resin systems will provide sound composite hardware and structures if some simple procedures are followed. Keep in mind that these procedures are good practice for all composite prepreg and adhesive materials and should be used whenever possible.

FREEZER STORAGE

Cyanate Esters (CEs) should always be sealed in an airtight bag and kept frozen below -12°C (10°F) when not being used. A good safety measure is to have a bag of desiccant (silica moisture absorber) in the core of the prepreg roll just in case a pinhole in the bag or other problem occurs.

MOISTURE ABSORPTION AND SENSITIVITY

While very resistant to moisture absorption after cure, CEs can be adversely affected by moisture uptake prior to cure. For this reason, all materials must be “thoroughly thawed” to room temperature prior to opening the sealed bag to avoid condensation on the material. Also, it is good practice to keep prepreg and in-process hardware in a sealed bag or vacuum bag if to be exposed to the atmosphere for long periods of time.

HANDLING OF MATERIALS

When handling any prepreg materials, one should always be wearing clean, powder-free latex gloves. This will assure that no hand oils are transferred to the prepreg and/or composite during processing. The presence of oils in the part could lead to problems in both mechanical and electrical performance of the part. This also guards against any dermatitis that could occur with certain users.

PRODUCT DATA SHEET

NONMETALLIC HONEYCOMB AND FOAM CORE USE

When using nonmetallic honeycomb and foam core materials for sandwich structures, the materials should always be dried in an oven prior to lay-up to drive off any moisture that may be in the core. The material should then be cooled in the presence of a desiccant, to avoid any moisture uptake. Following this procedure, it is always a good idea to use the material as soon as possible to avoid rehydration.

Recommended Core Dry Time/Temp: 121°C (250°F) for 3–4 hours (minimum), core must be kept dry until it is used.

SELF ADHESIVE PROPERTIES AND FILM ADHESIVE USE

Toray Advanced Composites cyanate ester resins have been formulated to have good self-adhesive properties to core materials. However, this should not be taken as a green light to eliminate a film adhesive from a cored, structural piece of hardware. This option has been given by Toray for customers who are looking for the best electrical properties available by not using a film adhesive. Toray recommends that the structural integrity be verified per customer specification prior to end item usage and takes no responsibility otherwise.

If this option is exercised, the following modified cure cycle has been found to work well.

1. Ramp the part to 66–71°C (150–160°F) (Keep Pressure < 15 Psi)
2. Dwell for approximately 1 hour
3. Ramp the part to the recommended cure temperature for the resin and cure per the provided standard cure cycle.

LAY-UP AREA ENVIRONMENTAL CONTROLS

Toray recommends that any composite or adhesive lay-up be performed in a clean area visibly free from dust. Any work surfaces should likewise be free of residue, dust, or debris. No eating or smoking shall be allowed in the shop area. For radome materials, conductive materials shall not be allowed in the process area. The processing shop area should be maintained between 16–25°C (60–77°F) with a relative humidity of no greater than 70%.

BAGGING FOR CURE

Toray recommends that CE composite parts bagged for cure should be performed as follows.

1. Release the tool surface
2. Lay-up part using standard debulking procedures
3. Dam the edges of the part for cure
4. Place 1 ply of porous Teflon® or perforated Teflon® onto the bag surface of the part
5. Place bleeder layers over porous Teflon® material and trim to the part periphery
6. Place a non-porous layer of Teflon® over the part
7. Utilize a breather cloth to facilitate vacuum draw
8. Install vacuum bag on the tool for cure
9. Follow the provided Toray cure cycle for the particular resin system

Toray EX-1515



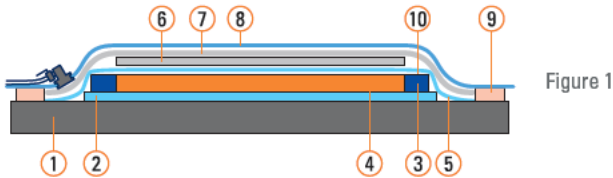
PRODUCT DATA SHEET

TYPICAL COMPOSITE LAMINATE STACKING SEQUENCE

List of Materials

1. Tool – aluminum, steel, Invar, composite (tool plates must be release coated or film covered).
2. Release coat or film – Frekote 700NC or 770NC, FEP, TEDLAR
Lay-up part using standard debulking procedures
3. Silicone edge dams for cure – slightly thicker than laminate
4. Laminate
5. Release coat or film – Frekote 700NC or 770NC, FEP, TEDLAR
6. Caul plate – aluminum, steel, Invar, silicone rubber sheet (metal caul plates must be release coated or wrapped)
7. 2.2 oz/yd² polyester breather, 1 or more
8. Vacuum bag
9. Vacuum sealant
10. Glass yarn string (alternatively or additionally breather may wrap over top of dam to contact edge)

Follow the provided Toray Advanced Composites cure cycle for the particular resin system.



Revised 01/2020

TORAY_EX1515_PDS_v5.1_2020-01-28 Page 7/7

© 2020. All data given is based on representative samples of the materials in question. Since the method and circumstances under which these materials are processed and tested are key to their performance, and Toray Advanced Composites has no assurance of how its customers will use the material, the corporation cannot guarantee these properties. Toray®, (Toray) AmberTool®, (Toray) Cetax®, (Toray) MicroPly®, and all other related characters, logos, and trade names are claims and/or registered trademarks of Toray Industries Inc. and/or its subsidiary companies in one or more countries. Use of trademarks, trade names, and other IP rights of Toray Industries Inc. without prior written approval by such is strictly prohibited.



www.toraytac.com



Abbildung A.6: Toray Datenblatt EX-1515



Hysol® EA 9396

Epoxy Paste Adhesive

Henkel Corporation
Aerospace Group

██████████
██████████
925.458.8000

██████████
www.aerospace.henkel.com

Description

Hysol EA 9396 is a low viscosity, room temperature curing adhesive system with excellent strength properties at temperatures from -67°F to 350°F (-55°C to 177°C). Hysol EA 9396 has a shelf life of one year when stored @ 77°F/25°C for separate components. Qualified to MMM-A-132, Rev A, Type 1, Class 3.

Features

Low Viscosity
Room Temperature Cure
Room Temperature Storage
High Strength at Low and High Temperatures

Uncured Adhesive Properties

	<u>Part A</u>	<u>Part B</u>	<u>Mixed</u>
Color	Aqua-Blue	Light Amber Red - Purple (Gardner color 17+)	Green to Dark Purple
Viscosity @ 77°F Brookfield, HBT	400 - 1,400 Poise Spdl 4 @ 10 rpm	0.7 - 1.1 Poise Spdl 1 @ 100 rpm	35 Poise Spdl 1 @ 20 rpm
Viscosity @ 25°C Brookfield, HBT	80 Pa·S Spdl 4 @ 2.1 rad/s	0.1 Pa·S Spdl 1 @ 10.5 rad/s	3.5 Pa·S Spdl 1 @ 2.1 rad/s
Density (g/ml)	1.19	1.00	1.14
Shelf life			
@ <40°F/4°C	1 year	1 year	
@ <77°F/25°C	1 year	1 year	

This material will normally be shipped at ambient conditions, which will not alter our standard warranty, provided that the material is placed into its intended storage upon receipt. Premium shipment is available upon request.

Handling

Mixing - This product requires mixing two components together just prior to application to the parts to be bonded. Complete mixing is necessary. The temperature of the separate components prior to mixing is not critical, but should be close to room temperature (77°F/25°C).

Mix Ratio

By Weight

Part A

100

Part B

30

Note: Volume measurement is not recommended for structural applications unless special precautions are taken to assure proper ratios.

Pot Life (450 g mass) 75 - 90 minutes
 Method - ASTM D2471 in water bath.

Application

Mixing - Combine Part A and Part B in the correct ratio and mix thoroughly. THIS IS IMPORTANT! Heat buildup during or after mixing is normal. Do not mix quantities greater than 450 grams as dangerous heat buildup can occur causing uncontrolled decomposition of the mixed adhesive. TOXIC FUMES CAN OCCUR, RESULTING IN PERSONAL INJURY. Mixing smaller quantities will minimize the heat buildup.

Applying - Bonding surfaces should be clean, dry and properly prepared. For optimum surface preparation consult the Hysol Surface Preparation Guide. The bonded parts should be held in contact until the adhesive is set. Handling strength for this adhesive will occur in 24 hours @ 77°F/25°C, after which the support tooling or pressure used during cure may be removed. Since full bond strength has not yet been attained, load application should be small at this time.

Curing - This adhesive may be cured for 3 to 5 days @ 77°F/25°C to achieve normal performance. Accelerated cures of 1 hour @ 150°F/66°C may be used.

Cleanup - It is important to remove excess adhesive from the work area and application equipment before it hardens. Denatured alcohol and many common industrial solvents are suitable for removing uncured adhesive. Consult your supplier's information pertaining to the safe and proper use of solvents.

Bond Strength Performance

Tensile Lap Shear Strength

Tensile lap shear strength tested per ASTM D1002 after curing as shown below.
 Adherends are 2024-T3 bare aluminum treated with phosphoric acid anodized per ASTM D3933.

Test Temperature °F/°C	Typical Results						
	Cure		Cure		Cure		
	5 days @ 77°F/25°C	1 hour @ 150°F/66°C	30 min @ 180°F/82°C	psi	MPa	psi	MPa
-67/-55	3,300	22.8	3,300	22.8	3,500	24.1	24.1
77/25	3,500	24.1	4,000	27.6	4,000	27.6	27.6
180/82	3,200	22.0	3,300	22.8	3,300	22.8	22.8
300/149	1,800	12.4	1,800	12.4	1,900	13.1	13.1
350/177	1,250	8.6	1,200	8.3	1,200	8.3	8.3

Peel Strength

Bell Peel strength tested per ASTM D3167 after curing for 5 days @ 77°F/25°C.
 Adherends are 2024-T3 bare aluminum treated with phosphoric acid anodized per ASTM D3933.

Test Temperature °F/°C	Typical Results	
	lb/in	N/25mm
77/25	25	111
180/82	20	89

Specifications

The above values are typical results under ideal conditions. To establish certification values, please refer to the Henkel Aerospace Specification which defines quality control test values, methods and procedures. For a copy of the Henkel Aerospace Specification, contact Henkel's Literature Desk at (925) 458-8000.

Service Temperature

Service temperature is defined as that temperature at which this adhesive still retains 1000 psi/6.9 MPa using test method ASTM D1002 and is approximately 350°F/177°C.

Henkel QC Acceptance Testing

This data sheet provides users with typical properties obtained from this adhesive. These values are not meant to be used to develop aerospace QC acceptance testing. Users interested in establishing values and tests for routine QC acceptance should request the Henkel Aerospace Specification (LAS) which provides detail test methods and values used to certify this adhesive.

Bulk Resin Properties

	psi	MPa
Tensile Strength @ 77°F/25°C	8,000	35.2
Tensile Modulus @ 77°F/25°C	400,000	2,750
	%	
Elongation at Break @ 77°F/25°C	3.4	

Electrical Properties - tested per ASTM D149, D150.

	0.1 KHz	1.0 KHz	10.0 KHz
Dielectric Constant	4.17	4.12	3.97
Dissipation Factor	0.006	0.017	0.031
Volume Resistivity	2.14 x 10 ¹⁵ (ohm-cm)		
Surface Resistivity	3.17 x 10 ¹⁴ (ohm)		
Thermal Conductivity	5.01 x 10 ⁻⁴ (cal/sec x cm x deg C)		
Coefficient of Thermal Expansion (Alpha)	70.7 μm/m°C @ 40°C 108.0 μm/m°C @ 100°C		
Shore D Hardness, @77°F/25°C	80		

Handling Precautions

Do not handle or use until the Material Safety Data Sheet has been read and understood.
For industrial use only.

General:

As with most epoxy based systems, use this product with adequate ventilation. Do not get in eyes or on skin. Avoid breathing the vapors. Wash thoroughly with soap and water after handling. Empty containers retain product residue and vapors, so obey all precautions when handling empty containers.

Hysol EA 9396
Henkel Corporation
Aerospace Group
Page 4 of 4

PART A

CAUTION! This material may cause eye and skin irritation or allergic dermatitis. It contains epoxy resins.

PART B

WARNING! This material causes eye and skin irritation or allergic dermatitis. It contains amines.

Hysol® is a registered trademark of Henkel Corporation.

Rev. 6/02

DISCLAIMER: The information supplied in this document is for guidance only and should not be construed as a warranty. All implied warranties are expressly disclaimed, including without limitation any warranty of merchantability and fitness for use. All users of the materials are responsible for assuring that it is suitable for their needs, environmental and use. All data is subject to change as Henkel deems appropriate.

Users should review the Materials Safety Data Sheet (MSDS) and product label for the material to determine possible health hazards, appropriate engineering controls and precautions to be observed in using the material. Copies of the MSDS and label are available upon request.



Henkel Corporation
Aerospace Group

██████████
Bay Point, CA 94565 USA
925.458.8000
www.aerospace.henkel.com

Abbildung A.7: Hysol Datenblatt EA 9396

