



Technische
Universität
Berlin

Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme
Institut für Werkzeugmaschinen und
Fabrikbetrieb
Fachgebiet Beschichtungstechnik
Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Rupprecht

Bachelorarbeit

Konstruktion und Aufbau eines flexiblen Bearbeitungstisches für zwei robotergestützte Plasma-Bearbeitungsverfahren

Vorgelegt von:

Yassine Kraiem

Matrikelnummer: 457695

Studiengang: Maschinenbau

yassine.kraiem@campus.tu-berlin.de

Berlin, den 24. Juli 2024

Erstprüfer*in

Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Rupprecht
rupprecht@tu-berlin.de

Zweitprüfer*in

Dr.-Ing. Georg Thomas
georg.thomas@tu-berlin.de

Betreuer*in

M.Sc Müslüm Ider
m.ider@tu-berlin.de

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit eigenständig ohne Hilfe Dritter und ausschließlich unter Verwendung der aufgeführten Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen die den benutzten Quellen und Hilfsmitteln unverändert oder sinngemäß entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.

Sofern generische KI-Tools verwendet wurden, habe ich Produktnamen, Hersteller, die jeweils verwendete Softwareversion und die jeweiligen Einsatzzwecke (z.B. sprachliche Überprüfung und Verbesserung der Texte, systematische Recherche) benannt. Ich verantworte die Auswahl, die Übernahme und sämtliche Ergebnisse des von mir verwendeten KI-generierten Outputs vollumfänglich selbst.

Die Satzung zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis an der TU Berlin vom 8. März 2017. https://www.static.tu.berlin/fileadmin/www/10000060/FSC/Promotion___Habilitation/Dokumente/Grundsaetze_gute_wissenschaftliche_Praxis_2017.pdf habe ich zur Kenntnis genommen.

Ich erkläre weiterhin, dass ich die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt habe. Berlin, den 24. Juli 2024

.....
Yassine Kraiem

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, einen Plasma-Bearbeitungstisch für eine Roboter-Vorrichtung im Fachgebiet der Beschichtungstechnik aufzubauen. Die Durchführung des Projekts erfolgte gemäß den Richtlinien der VDI 2221. Zu Beginn erfolgte eine Recherche zum Stand der Technik, gefolgt von der Erstellung einer Anforderungsliste. Anschließend wurden Blackbox-Darstellungen und eine Funktionsstruktur erstellt, um die Hauptfunktionen des Tisches zu analysieren und als Vorbereitung für die morphologische Kastenmethode zu dienen. Dadurch wurden Lösungsmöglichkeiten aufgelistet und drei Konzepte ausgewählt. Die Konzepte wurden anhand bestimmter Kriterien untersucht und bewertet.

Nach Auswahl des Konzepts wurde ein Modell mit einer Modellierungssoftware erstellt und anschließend durch Berechnungen und Anpassungen an die Anforderungen optimiert und verbessert. Im Anschluss an den theoretischen Teil des Projekts wurden die notwendigen Teile bestellt und zusätzliche Komponenten konstruiert. Der Tisch wurde dann zusammengebaut und kalibriert. Danach wurden die neu entwickelten Module zum Plasmaschneiden durch Versuche mit Thermografie untersucht.

Die Ergebnisse der Arbeit waren ein stabiler Plasma-Bearbeitungstisch, der die Anforderungen erfüllt, sowie Raum für verschiedene Verbesserungsmöglichkeiten und eine hohe Modularität bietet.

Abstract

The aim of this thesis is to develop a plasma processing table for a robotic device in the field of coating technology. The project was carried out in accordance with the guidelines of VDI 2221. Initially, a state-of-the-art review was conducted, followed by the creation of a list of requirements. Subsequently, black-box diagrams and a functional structure were developed to analyze the main functions of the table and to serve as a basis for the morphological box method. This led to the listing of potential solutions and the selection of three concepts. These concepts were examined and evaluated based on specific criteria.

After selecting the concept, a model was created using modeling software and then optimized and improved through calculations and adjustments to meet the requirements. Following the theoretical part of the project, the necessary parts were ordered and additional components were constructed. The table was then assembled and calibrated. Subsequently, the newly developed modules for plasma cutting were examined through experiments using thermography. The results of the work include a stable plasma processing table that meets the requirements, while also offering room for various improvements and a high degree of modularity.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Abbildungsverzeichnis | vii |
| Tabellenverzeichnis | ix |
| Symbolverzeichnis | x |
| 1. Einleitung | 1 |
| 2. Motivation | 2 |
| 3. Stand der Technik | 3 |
| 3.1. Physikalische Grundlagen von Plasma | 3 |
| 3.2. Plamaschweißen | 4 |
| 3.3. Plasmaschneiden | 5 |
| 3.4. VDI-Richtlinien | 7 |
| 3.4.1. Analysieren | 9 |
| 3.4.2. Konzipieren | 10 |
| 3.4.3. Ausarbeiten | 13 |
| 3.5. Marktanalyse | 14 |
| 3.6. Untersuchung des bestehenden Bearbeitungstisches | 17 |
| 4. Methodische Produktentwicklungsprozesse der Bearbeitungstische | 19 |
| 4.1. Projektplan | 19 |
| 4.2. Analysephase der Bearbeitungstische | 19 |
| 4.2.1. Anforderungsliste | 19 |
| 4.2.2. Black-Box-Darstellung | 21 |
| 4.2.3. Funktionsanalyse | 21 |
| 4.3. Konzeptionsphase der Bearbeitungstische | 24 |
| 4.3.1. Bildung von Lösungskonzepten | 25 |
| 4.3.2. Konzeptbeschreibung | 26 |
| 4.3.3. Bewertung der Lösungskonzepte | 29 |
| 4.4. Entwurfsphase der Bearbeitungstische | 31 |
| 4.4.1. Bestimmung der Bemaßungen | 31 |
| 4.4.2. Gesamtentwurf | 34 |
| 4.5. Ausarbeitsphase der Bearbeitungstische | 36 |
| 4.5.1. Berechnungen | 36 |

| | |
|---|----|
| 4.5.2. Technische Dokumentation | 59 |
| 5. Ergebnisse und Auswertung | 61 |
| 6. Fazit und Ausblick | 63 |
| Literatur | 65 |
| A. Anhang | 68 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| 3.1. Übergang zwischen den Aggregatzuständen: Fest, Flüssig, Gasförmig und Plas- | 3 |
| ma [3] | |
| 3.2. Plasmeschweißanlage [2] | 4 |
| 3.3. Schematische Darstellung von Plasmuschneidverfahren [2] | 6 |
| 3.4. Vorgehensplan der methodischen Entwicklung technischer Produkte nach VDI 2221 [12] | 8 |
| 3.5. Black-Box-Darstellung [10] | 10 |
| 3.6. Morphologischer Kasten zur Ermittlung möglicher Lösungskombinationen [14] | 11 |
| 3.7. Allgemeine Festigkeitsnachweis [14] | 14 |
| 3.8. Schweißtische von Demmeler [15] | 15 |
| 3.9. Mobiler Hubtisch [16] | 16 |
| 3.10. Plasmuschneider [19] | 17 |
| 3.11. Wasserschneidtisch [18] | 17 |
| 3.12. Bestehende Bearbeitungstische | 18 |
| | |
| 4.1. Black-Box-Darstellung des Bearbeitungstisches | 21 |
| 4.2. Baumstruktur einer Plasma Bearbeitungstische | 22 |
| 4.3. Schematische Darstellung von Konzept 1 | 27 |
| 4.4. Schematische Darstellung von Konzept 2 | 28 |
| 4.5. Schematische Darstellung von Konzept 3 | 29 |
| 4.6. Roboterzelle | 32 |
| 4.7. Schematische Darstellung des verfügbaren Arbeitsraums | 32 |
| 4.8. Arbeitsbereich IRB 4400/60 [20] | 33 |
| 4.9. Schematische Darstellung der Roboterzelle | 34 |
| 4.10. Gesamtentwurf des Plasmabearbeitungstisches | 35 |
| 4.11. Gesamtentwurf der runden Plasmuschneidaufnahmen | 36 |
| 4.12. Gesamtentwurf der eckigen Plasmuschneidaufnahmen | 36 |
| 4.13. Schematische Darstellung des Beispielsystems | 37 |
| 4.14. Freischnitt des Beispielsystems | 38 |
| 4.15. Schnittlastendarstellung im ersten Bereich | 39 |
| 4.16. Momentverlauf | 40 |
| 4.17. Kräfteverlauf | 40 |
| 4.18. Simulationsergebnisse der Von-Mises-Spannung | 43 |
| 4.19. Simulationsergebnisse des Sicherheitsfaktors | 44 |
| 4.20. Sicherheitsfaktor-Ergebnisse auf dem Tisch | 46 |

| | |
|--|----|
| 4.21. Darstellung des Behälters | 48 |
| 4.22. Sicherheitsfaktor-Ergebnisse des Behälters | 48 |
| 4.23. Darstellung der Rastbolzen | 49 |
| 4.24. Darstellung des Tisches mit offenem Behälter | 50 |
| 4.25. Simulationsergebnisse der Plamaschneidaufnahmen - Sicherheitsfaktor | 52 |
| 4.26. Ausgewähltes Werkstück für die Versuche | 54 |
| 4.27. Darstellung der maximalen Temperatur beim ersten Versuch | 55 |
| 4.28. Darstellung der maximalen Temperatur beim zweiten Versuch | 56 |
| 4.29. Schneidergebnisse beim ersten und zweiten Versuch | 56 |
| 4.30. Zustand der Plamaschneidaufnahme nach dem ersten und zweiten Versuch - Vorderansicht | 57 |
| 4.31. Zustand der Plamaschneidaufnahme nach dem ersten und zweiten Versuch - Oberesicht | 57 |
| 4.32. Verlauf der maximalen Temperatur bei jeder Frame über die Zeit beim ersten Verusch | 58 |
| 4.33. Verlauf der maximalen Temperatur bei jeder Frame über die Zeit beim zweiten Verusch | 58 |
| 5.1. Fertiggestellter Bearbeitungstisch | 62 |
| 5.2. Anwendungsmöglichkeiten der Bearbeitunstisches | 62 |
| 5.3. Behälter im gesperrten Zustand | 62 |
| A.1. Prozess der Montage der Plamaschweißplatte mit dem Kran | 75 |
| A.2. Positionierung des Tisches in der Roboterzelle | 76 |
| A.3. Montierte Behälter | 77 |
| A.4. Versuch 1 - Frame mit maximaler Temperatur Colorbar Grey | 82 |
| A.5. Versuch 1 - Frame mit maximaler Temperatur Colorbar Plasma | 82 |
| A.6. Versuch 1 - Frame mit maximaler Temperatur Colorbar Viridis | 82 |
| A.7. Versuch 2 - Frame mit maximaler Temperatur Colorbar Grey | 83 |
| A.8. Versuch 2 - Frame mit maximaler Temperatur Colorbar Plasma | 83 |
| A.9. Versuch 2 - Frame mit maximaler Temperatur Colorbar Viridis | 83 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| 3.1. Punkteskala für das Bewertungssystem [14] | 12 |
| 3.2. Beispielsystem zur technischen Bewertung von drei Lösungskonzepten [14] | 13 |
| 4.1. Anforderungsliste für die Bearbeitungstische für Plasma-Schweiß- und Schneidroboter | 20 |
| 4.2. Morphologischer Kasten | 26 |
| 4.3. Technische Bewertung | 31 |
| 4.4. Hauptbereiche der Tische | 35 |
| 4.5. Informationen zum Beispielsystem | 37 |
| 4.6. Ergebnisse der manuellen Berechnung für die kritische Stelle | 42 |
| 4.7. Ergebnisse der Berechnungen des Beispielsystems mit Inventor | 44 |
| 4.8. Vergleich der Plamaschweißplatten | 45 |
| 4.9. Simulationsergebnisse des Tisches | 46 |
| 4.10. Simulationsergebnisse der Behälter | 49 |
| 4.11. Simulationsergebnisse der Plamaschneidaufnahmen | 52 |
| 4.12. Simulationsergebnisse der runden Plamaschneidaufnahmen | 53 |
| 4.13. Versuchsbedingungen für die Plamaschneidversuche [32, S. 138] | 54 |

Symbolverzeichnis

| <u>Symbol</u> | <u>Bedeutung</u> | <u>Einheit</u> |
|-----------------|-------------------------------------|----------------|
| T | Temperatur | K - °C |
| F | Kraft | N |
| $R_e(R_{p0.2})$ | Streckgrenze | MPa |
| d | Durchmesser | m |
| L | Länge | m |
| M_b | gesamtes Biegemoment | Nm |
| τ_t | Torsionsspannung | Mpa |
| M_t | Torsionsmoment | Nm |
| W_t | Widerstandsmoment für Torsion | m^3 |
| σ_b | Vorhandene Biegespannung | Mpa |
| W_b | Widerstandsmoment für Biegung | m^3 |
| σ_{zd} | Zug-Druckspannung | MPa |
| A | Fläche | m^2 |
| σ_v | Vergleichsspannung (nach von Mises) | MPa |
| σ_{zul} | zulässige Spannung | MPa |
| S | Sicherheit | — |
| P | Strahlungsleistung | W |
| σ | Stefan-Boltzmann Konstante | W/m^2K^4 |
| ε | Emissionsgrad | — |

1. Einleitung

Die fortschreitende Automatisierung durch 6-Achs-Roboter spielt eine immer bedeutendere Rolle in der modernen Fertigungsindustrie. Insbesondere robotergestützte Plasmabearbeitungsverfahren haben sich als effiziente Methoden zur präzisen Materialbearbeitung etabliert. Die Entwicklung und Konstruktion von Bearbeitungstischen, die die Anforderungen dieser hochmodernen Verfahren erfüllen, sind von zentraler Bedeutung, um maximale Effizienz und Präzision zu gewährleisten. Diese Bachelorarbeit widmet sich der Konstruktion und dem Aufbau eines Bearbeitungstisches, der speziell für den Einsatz von zwei robotergestützten Plasma-Bearbeitungsverfahren im Fachgebiet der Beschichtungstechnik optimiert ist. Durch eine systematische Herangehensweise gemäß den VDI 2221 Richtlinien wird ein flexibler und anpassungsfähiger Tisch entwickelt, der sowohl für das Plamaschweißen als auch für das Plasmaschneiden geeignet ist.

2. Motivation

Die Motivation für diese Forschungsarbeit liegt in der stetigen Suche nach Verbesserungen in der industriellen Fertigungstechnologie, insbesondere im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit und Flexibilität von Plasma-Bearbeitungsprozessen im Bereich der Beschichtungstechnik. In der modernen Fertigung sind Flexibilität und Anpassungsfähigkeit von zentraler Bedeutung, um schnell auf wechselnde Anforderungen und verschiedene Bearbeitungsszenarien reagieren zu können. Der Bedarf an multifunktionalen Bearbeitungstischen, die sich leicht an unterschiedliche Aufgaben anpassen lassen, ist daher groß.

Zudem eröffnet die Integration von robotergestützten Verfahren in die Fertigung neue Möglichkeiten zur Steigerung der Produktivität und Qualität. Robotergestützte Plasma-Bearbeitungsverfahren bieten hohe Präzision und Effizienz, erfordern jedoch spezielle Infrastrukturen wie geeignete Bearbeitungstische, um ihr volles Potenzial auszuschöpfen. Insbesondere im Fachgebiet der Beschichtungstechnik, wo präzise und gleichmäßige Beschichtungen von Materialien erforderlich sind, ist ein speziell entwickelter Bearbeitungstisch von großem Nutzen. Diese Arbeit zielt darauf ab, durch die Entwicklung eines innovativen und flexiblen Bearbeitungstisches einen Beitrag zur Optimierung der Plasma-Bearbeitungsprozesse zu leisten und gleichzeitig zukünftige Entwicklungen in der industriellen Fertigungstechnologie zu ermöglichen.

Durch die Umsetzung dieser Ziele trägt die Arbeit dazu bei, die Effizienz und Qualität von Plasma-Bearbeitungsverfahren im Bereich der Beschichtungstechnik zu verbessern und die Grundlage für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in diesem Bereich zu schaffen.

3. Stand der Technik

Dieser Abschnitt bietet einen umfassenden Überblick über die aktuellen Technologien und Methoden, die in das Projekt benötigt. Dabei werden die physikalischen Grundlagen und die verschiedenen Anwendungen von Plasma im Schweißen und Schneiden behandelt. Zusätzlich werden die einschlägigen VDI-2221 Richtlinien erläutert. Ergänzt wird dieser Abschnitt durch eine Marktanalyse und die Untersuchung des bestehenden Bearbeitungstisches.

3.1. Physikalische Grundlagen von Plasma

Plasma ist ein Aggregatzustand der Materie, der neben den Zuständen fest, flüssig und gasförmig existiert. Es handelt sich dabei um ein Gas, das dissoziiert und stark ionisiert ist und somit elektrische Leitfähigkeit besitzt. Dieses Gas besteht hauptsächlich aus Ladungsträgern, nämlich Ionen und Elektronen. Dieser Zustand des Gases wird durch die Zuführung von hohen Energiemengen, wie elektrische Entladungen oder Strahlung erreicht. Dadurch erhöht sich die Geschwindigkeit der Gaspartikel und es kommt zu Zusammenstößen, bei denen die Ionen und Elektronen der Atome dissoziieren und ionisiert werden [1, 2]. Die Abbildung 3.1 zeigt den Übergang zwischen den vier Aggregatzuständen der Materie.

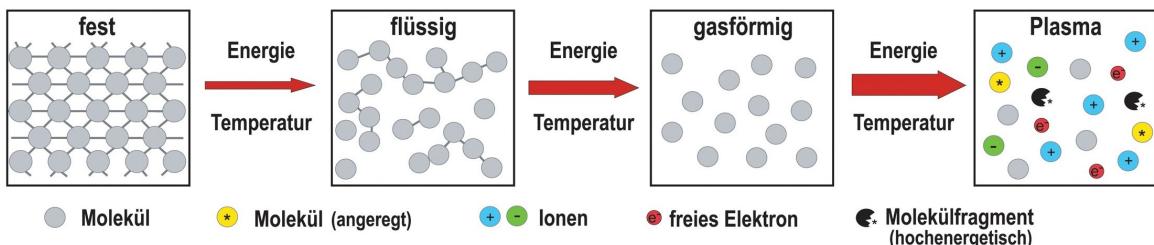


Abbildung 3.1.: Übergang zwischen den Aggregatzuständen: Fest, Flüssig, Gasförmig und Plasma [3]

Um ein Elektron vollständig aus einem Atom oder Molekül zu entfernen und ein Ion zu erzeugen, wird eine bestimmte Energiemenge benötigt. Diese Energiemenge, die als Ionisierungsenergie bezeichnet wird, ist ein Maß für die Bindungsstärke der Elektronen im Atom. Um ein Gas in ein Plasma zu verwandeln, muss Energie zugeführt werden, die mindestens dieser Energiemenge entspricht [4, 5]. Beispielsweise benötigt Wasserstoff eine Energie von 13,6 eV pro Atom, um ionisiert zu werden. Wenn diese Energie zugeführt wird, entstehen positiv geladene Wasserstoffionen und freie Elektronen, was die Grundlage für ein Plasma ist [4].

Plasmen können in verschiedenen natürlichen Phänomenen wie Blitzen oder Funken beobachtet werden. Die Forschung in diesem Bereich begann in den 1940er Jahren, als Wissenschaftler

versuchten, Möglichkeiten zu erforschen, wie die in diesen Plasmen auftretenden Kernfusionsreaktionen zur Energieerzeugung genutzt werden könnten. Heutzutage wird Plasma in verschiedenen technologischen Anwendungen eingesetzt, darunter Plasma-Lampen und die Mikrochip-Ätzung [6].

3.2. Plamaschweißen

Plamaschweißen gehört zum additiven Fertigungsverfahren und stellt einen hochpräziser und effizienter Prozess dar, der in der Metallverarbeitung eingesetzt wird. Diese Fertigungsverfahren gehört zu technologischen Anwendungen von Plasma, die durch Zufuhr von elektrischer Ladung erzeugt. Die Abbildung 3.2 stellt eine schematische Darstellung von einem Plamaschweißanlage.

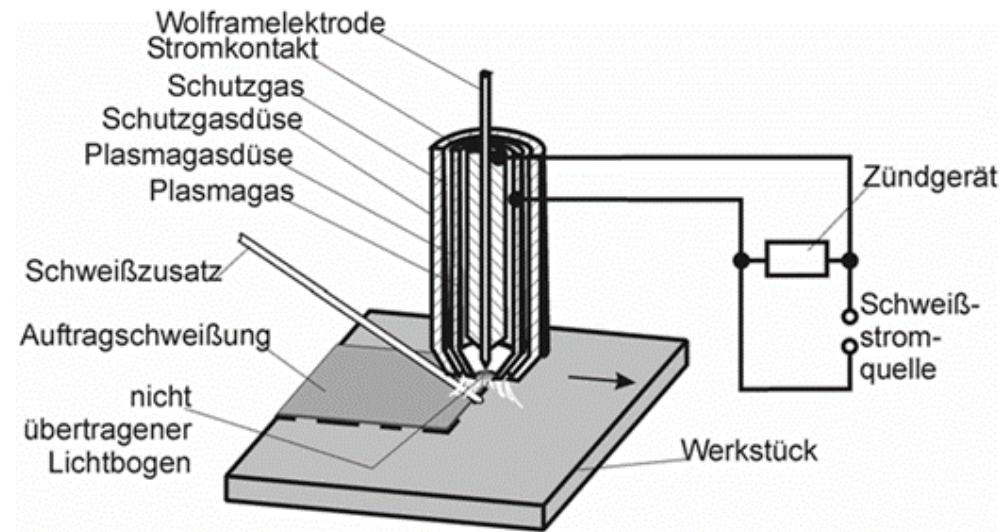


Abbildung 3.2.: Plamaschweißanlage [2]

Im Plamaschweißen entsteht ein Hilfslichtbogen, auch nichtübertragender Lichtbogen genannt, zwischen der Wolframelektrode und dem Werkstück. Dieser Hilfslichtbogen zündet das Plasmagas an und bewirkt die Ionisation, wodurch der übertragende Lichtbogen auf dem Werkstück entsteht. Dieser Lichtbogen zeichnet sich durch seine hohe Temperatur aus. Der wird durch eine Düse gebündelt und durch ein Schutzgas stabilisiert, um den Lichtbogenquerschnitt zu optimieren. Zusätzlich schützt das Schutzgas die Schweißstelle vor atmosphärischen Einflüssen [2].

Aufgrund seines hohen Ionisationsgrades und seiner geringen Ionisationsenergie empfiehlt sich die Nutzung von Argon als Plasmagas. Je nach Werkstoff kann die Gaswahl optimiert werden. Beispielsweise empfiehlt sich beim Schweißen von Werkstoffen wie CrNi-Stählen die Verwendung einer Mischung aus Argon und einem geringen Anteil Wasserstoff. Diese Kom-

bination ermöglicht durch ihre hohe Energie eine Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit und der Einbrandtiefe [7]

Als Schutzgas empfiehlt sich die Nutzung eines kalten Gases, das eine geringe Wärmeleitfähigkeit besitzt. Alternativ kann auch ein Gas verwendet werden, das eine gute Wärmeleitfähigkeit hat, jedoch eine hohe Ionisierungsenergie benötigt und somit schwer zu ionisieren ist. Ein Beispiel hierfür wäre eine Mischung aus Argon und Wasserstoff oder Helium [2].

Die Variation der Stromstärke, der Gasmenge und der Zufuhrgeschwindigkeit beeinflusst die Geschwindigkeit der Ladungsträger. Durch eine niedrige kinetische Energie wird vermieden, dass der zu bearbeitender Werkstoff im flüssigen Zustand weggeblasen wird. Somit sind diese Eigenschaften für das Plamaschweißen geeignet [1]. Die Temperaturen beim Plamaschweißen sind sehr hoch und können bis zu 30.000 K im Plasmakern erreichen, mit einer Leistung von bis zu 10^6 W/cm^2 [1].

Das Plamaschweißen bietet im Vergleich zu anderen Schweißverfahren schnellere Schweißgeschwindigkeiten. Der stabile und konzentrierte Lichtbogen sorgt dafür, dass Einflüsse von Schweißeinstellungen und äußeren Parametern, wie der Abstand des Werkstücks zum Brenner und die Werkstückmasse, die Schweißqualität weniger beeinträchtigen [8]. Aufgrund seiner zahlreichen Vorteile wird das Plamaschweißen in vielen Industriezweigen eingesetzt. Es ermöglicht das Verbinden von Werkstücken mit einer Dicke ab 0,01 mm durch das Mikroplasmaschweißverfahren und kann hochlegierte Stähle, wie Chrom-Nickel-Stahl, mit einer Dicke von bis zu 13 mm bei höheren Geschwindigkeiten als andere Schweißmethoden verarbeiten [8]. Diese Effizienz und Vielseitigkeit machen das Plamaschweißen zu einer bevorzugten Methode in der Flugzeugproduktion, beim Bau von Reaktoren sowie im Rohrleitungs- und Anlagenbau [2].

Trotz seiner Vorteile weist das Plamaschweißen auch einige Nachteile auf. Das Verfahren erfordert eine sorgfältige Vorbereitung der Naht, um eine spaltfreie Schweißnaht zu gewährleisten. Dies macht präzise Vorrichtungen zur Positionierung der Werkstücke notwendig, was die Kosten der Schweißanlage erhöht [2]. Ein zu hoher Plasmagasdruck kann die Nahtoberfläche eindrücken und die Wurzel durchhängen lassen. Zusätzlich können im Endkrater Poren und Lunker entstehen, daher muss das Stichloch beim Schweißprozess langsam geschlossen werden. Die Reaktion zwischen dem Kohlenstoff des zu schweißenden Stahls und Luftsauerstoff erzeugt Kohlenmonoxid, was ebenfalls zu Bildung von Poren führen kann. Deshalb ist es notwendig, beim Schweißen geeigneten Schweißzusatz zu verwenden [7].

3.3. Plamaschneiden

Plamaschneiden ist ein Fertigungsverfahren im Bereich des thermischen Abtragens. Es basiert auf dem gleichen Prinzip wie das Plamaschweißen, jedoch unterscheiden sich die Eigenschaften der zugeführten Energie. Beim Plamaschneiden wird die elektrische Energie, die dem Plasma zugeführt wird, erhöht, was die mechanische Wirkung verstärkt. Dadurch

wird der Werkstoff im flüssigen Zustand für die kinetische Energie der Plasmastrahlen weggeblasen, was zur Trennung des zu bearbeitenden Werkstücks führt [1]. Ein entscheidender Faktor beim Plasmaschneiden ist die Anwendung einer Kupferdüse mit Wasserkühlung. Diese führt zu einem stark konzentrierten Lichtbogen, der das Plasmaschneiden ermöglicht [8]. Im Gegensatz zum Plasmaschweißen wird beim Plasmaschneiden kein Schweißzusatzmaterial benötigt. Die Kerntemperatur der Plasmastahl kann je nach den Einstellungen Temperaturen zwischen 20000 und 30000 °C erreichen. [1]. Die Abbildung 3.3 stellt eine schematische Darstellung einer Plasmaschneidverfahren dar.

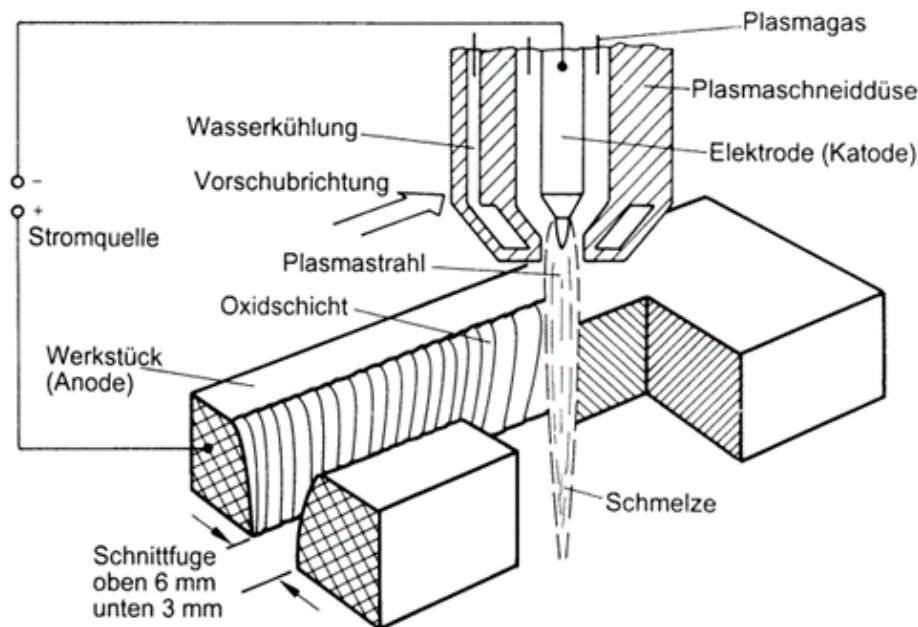


Abbildung 3.3.: Schematische Darstellung von Plasmaschneidverfahren [2]

Für die Auswahl eines geeigneten Schneidgases sind zwei wesentliche Anforderungen zu berücksichtigen und die sind eine hohe Wärmeleitfähigkeit und ein hohes Molekular- bzw. Atomgewicht. Die Wärmeleitfähigkeit spielt eine zentrale Rolle bei der Energieübertragung auf das Werkstück, während das Atomgewicht den Impuls und die kinetische Energie der Lichtbogen erhöht, was entscheidend ist, um den geschmolzenen Werkstoff aus der Schnittfuge zu entfernen. Zur Optimierung der Schnittflächenqualität und der Schneidgeschwindigkeit hat sich ein Gasgemisch aus 60 % Argon und 40 % Wasserstoff als besonders vorteilhaft erwiesen [8]. Das Plasmaschneiden bietet zahlreiche Vorteile und ermöglicht das präzise Schneiden von metallischen Werkstoffen, was es in zahlreichen Bereichen, wie dem Stahlbau, unverzichtbar macht. Es ist das einzige Schneidverfahren, das Aluminium- und Stahlbauteile mit mittleren bis großen Dicken effizient bearbeiten kann. Besonders vorteilhaft ist es für das Schneiden von Baustahl mit dünnen Abmessungen und für hochfeste Baustähle, da es eine minimale Wärmebeeinflussung aufweist. Ein herausragender Vorteil des Plasmaschneidens ist seine

deutlich höhere Geschwindigkeit im Vergleich zu anderen Trennverfahren wie dem autogenen Brennschneiden. Darüber hinaus sind die Schnittflächen so präzise, dass fast gar keine Nachbearbeitung erforderlich ist [7]. Aufgrund dieser hohen Genauigkeit wird das Plasmaschneiden häufig in Kombination mit 6-Achs-Robotern eingesetzt [9].

Das Plasmaschneiden, ein Verfahren, das auf einem hochenergetischen Plasmastrahl basiert, weist trotz seiner Effizienz und Flexibilität einige Schwachstellen und Nachteile auf. Zuerst ist das Plasmaschneiden auf Werkstücke mit einer maximalen Dicke von 150 mm begrenzt. Dies liegt daran, dass die Verbrennungswärme nicht ausreichend ist, um den Schneidvorgang durch dickere Materialien zu ermöglichen. Zusätzlich ist das Plasmaschneiden nur für leitfähige und schmelzbare Metalle geeignet. Der Grund dafür ist, dass der übertragene Lichtbogen nur bei solchen Materialien erzeugt werden kann, da diese Teil des geschlossenen Stromkreises sind. Bei nicht leitfähigen Werkstoffen ist dies nicht möglich [8]. Ein weiterer Nachteil ist, dass die hohe Energiedichte des Plasmastrahls oft zu breiteren Schnittfugen führt, die eine unvermeidbare konische Form haben, was die Präzision beeinträchtigen kann. Darüber hinaus erfordert der Betrieb der Schneidanlagen hohe Spannungen, was besondere Sicherheitsmaßnahmen wie Erdungen und Sicherheitsschaltungen notwendig macht. Außerdem weist das Verfahren hohe UV-Strahlung und starken Arbeitsgeräusch auf. Beim Schneiden mit bestimmten Gasgemischen entstehen toxische Gase und Rauch, die eine effektive Absaugung und Filterung erfordern. Ein zusätzliches Problem tritt beim Schneiden mit Luft als Plasmagas auf, da Stickstoff in das Material eingebracht werden kann, was zu einer unregelmäßigen Erhöhung der Härte und Veränderungen in der Wärmeeinflusszone führt. Zusammenfassend machen diese Faktoren das Plasmaschneiden in bestimmten Anwendungsbereichen weniger geeignet und erfordern sorgfältige Abwägungen hinsichtlich der Einsatzbedingungen und der zu schneidenden Materialien [2].

3.4. VDI-Richtlinien

Um einen klaren und strukturierten Arbeitsplan zu erstellen, wird der VDI 2221-Standard für die Entwicklung technischer Produkte und Systeme herangezogen. Der Konstruktionsprozess lässt sich in vier Phasen unterteilen, nämlich in Analysephase, Konzeptionsphase, Entwurfsphase und Ausarbeitungsphase.

Während der Analysephase werden zunächst die Anforderungen aufgelistet, gefolgt von der Darstellung des zu entwickelnden Systems als Black-Box und der Aufteilung des Gesamtsystems in unabhängige Subsysteme. Im Konzeptionsschritt werden dann verschiedene Lösungsmöglichkeiten für diese Subsysteme mithilfe von Ideenfindungsmethoden erarbeitet. Ein morphologischer Kasten wird genutzt, um die einzelnen Lösungsansätze zu kombinieren, und die Varianten werden anhand von Nutzwertanalysen oder anderen Methoden bewertet, um das beste Konzept auszuwählen. Beim Entwurf werden Skizzen der finalen Lösung erstellt, und grobe Berechnungen helfen bei der Festlegung der Bauteildimensionen. Schließlich um-

fasst die Ausarbeitung alle erforderlichen Berechnungen sowie die erschaffen eine technische Dokumentation wie Stücklisten und Zeichnungssätze [10, 11].

Die Abbildung 3.4 stellt den Vorgehensplan der methodischen Entwicklung technischer Produkte gemäß VDI 2221 dar:

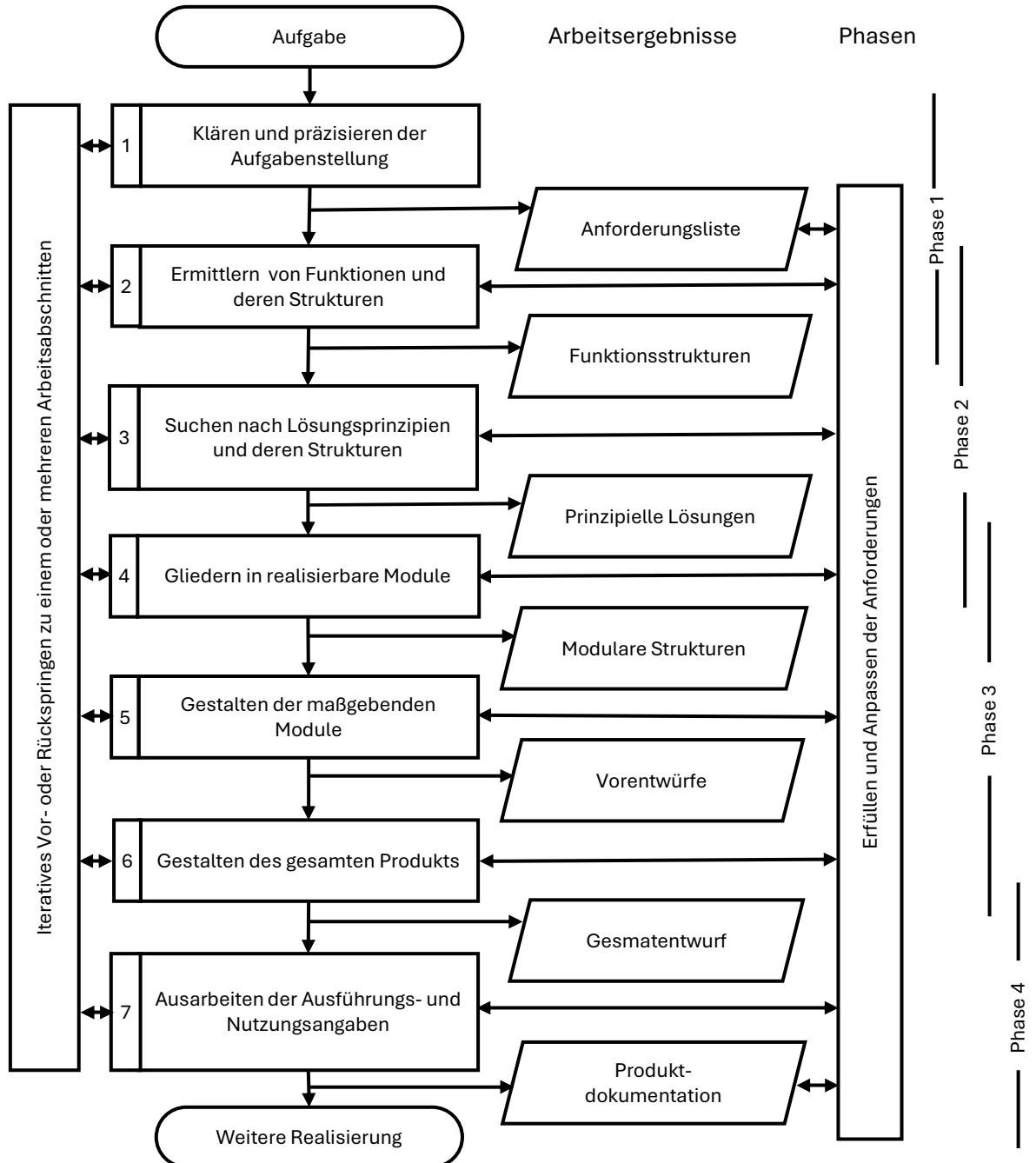


Abbildung 3.4.: Vorgehensplan der methodischen Entwicklung technischer Produkte nach VDI 2221 [12]

3.4.1. Analysieren

In diesem Abschnitt werden die Schritte der Analysephase erläutert und erklärt.

Anforderungsliste

Die Erstellung einer Anforderungsliste markiert den ersten Schritt in der Entwicklung technischer Produkte und Systeme. Diese Liste umfasst die Rahmenbedingungen, die für die zu entwickelnde Systeme relevant sind und in der Aufgabenstellung festgelegt wurden. In der Anforderungsliste sind obligatorische Anforderungen aufgeführt, die durch "F" gekennzeichnet sind. Diese Pflichtanforderungen müssen im Projekt unbedingt umgesetzt werden. Im Gegensatz dazu stehen Wunschanforderungen, die mit "W" gekennzeichnet sind. Diese Anforderungen sind optional und können während der Entwicklung vernachlässigt werden, wenn ihre Implementierung zu aufwendig ist oder die Kosten erhöht. Die Anforderungsliste enthält alle Verantwortlichen für die Anforderungen sowie die Begründungen dafür, die Einträge und Aktualisierungsdaten. Sie muss im Verlauf des Projekts aktualisiert werden. [10]

Black-Box-Darstellung

Nachdem die Anforderungsliste erstellt wurde, wird nun die Black-Box-Darstellung erzeugt. Diese Darstellung visualisiert die grundlegende Funktion eines Systems und seine Interaktion mit der Umwelt, ohne interne Strukturen oder Mechanismen zu berücksichtigen. Diese Abstraktion von technischen Details trägt dazu bei, die Kreativität und Innovation im Gestaltungsprozess zu fördern [11]. Die Black-Box-Darstellung ermöglicht eine externe Betrachtung des Systems, wobei der Fokus auf Ein- und Ausgangsgrößen liegt. Diese Darstellung enthält Informationen zu Input, Output, Emissionen und Immissionen sowie den Hauptfunktionen des Systems. Der Input umfasst alle Faktoren, die die Hauptfunktion ermöglichen, wie zum Beispiel das zu bearbeitendes Werkstück oder der benötigte Strom, während Output das realisierte Ergebnis darstellt, in diesem Fall das bearbeitete Werkstück. Unter Emissionen werden alle möglichen negativen Umwelteinflüsse und Auswirkungen erfasst, die durch das System entstehen können, wie z.B. Unfallgefahren. Im Gegensatz dazu sind Immissionen die Einflüsse der Umwelt auf das System. Die Immissionen bezeichnen alle möglichen Umweltauswirkungen und Einflüsse, die auf das System einwirken können und beim Konstruktionsprozess beachtet werden müssen. Dazu gehören Normen und behördliche Vorschriften [10]. Die Abbildung 3.5 veranschaulicht ein Beispielmodell der Black-Box-Darstellung.

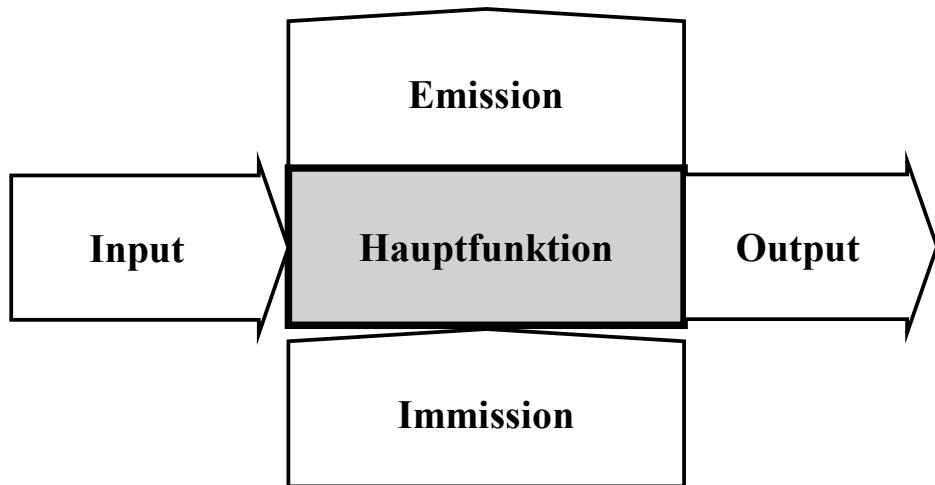


Abbildung 3.5.: Black-Box-Darstellung [10]

Funktionsanalyse

Im Gegensatz zur Black-Box-Darstellung, die das System von außen betrachtet, dient die Funktionsanalyse dazu, ein tieferes Verständnis des Systems zu erlangen. Daher ist es empfehlenswert, sich an einem bereits existierenden System zu orientieren, um diese Analyse durchzuführen. Die Funktionsanalyse hat die Aufgabe, das System in Teilfunktionen zu unterteilen, die für die Funktion des Systems wesentlich sind. Das Ziel dabei ist die Vorbereitung für die nächsten Schritte, um die Ideen und die Kreativität zu fördern, indem das System vereinfacht und weniger komplex gestaltet wird [10]. Es wird untersucht, wie das Bauteil typischerweise in Lehrbüchern dargestellt wird und welche spezifischen Anforderungen es erfüllt. Die Struktur des Bauteils wird durch die Identifikation und Beschreibung der notwendigen Strukturelemente definiert. Jedes Element wird hinsichtlich seiner Funktion im Gesamtprozess bewertet. Ein zu tief gegliedertes Design ist zu vermeiden, um Flexibilität in der Entwicklung alternativer Lösungen zu gewährleisten. Es ist essenziell, offene Gestaltungsmöglichkeiten zu bewahren. Dadurch soll die Gefahr minimiert werden, dass sich das Design zu stark an bestehenden Strukturen orientiert und innovative Ansätze vernachlässigt werden [10].

3.4.2. Konzipieren

In diesem Abschnitt werden die Schritte der Konzeptionsphase erläutert und erklärt.

Bildung von Lösungskonzepte

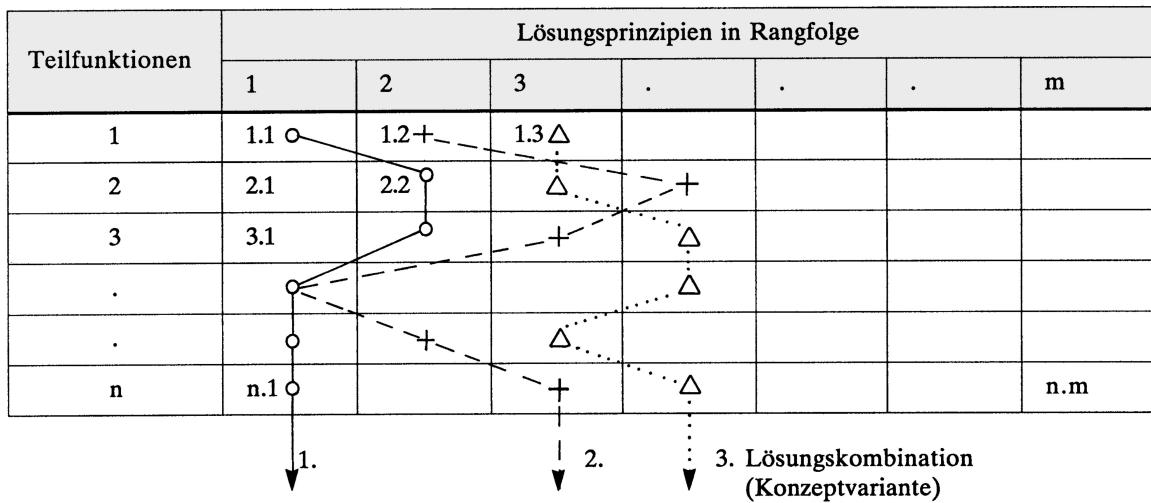
Zur Ermittlung von Lösungskonzepten wird zunächst eine Anforderungsliste basierend auf der Aufgabenstellung erstellt. Daraus werden die wesentlichen Funktionen abgeleitet, die

zur Erfüllung der Anforderungen notwendig sind. Hierbei sollen Wirkprinzipien mithilfe geeigneter Lösungsfindungsmethoden wie Brainstorming oder Kollektionsverfahren ermittelt werden. Die Brainstorming-Methode ist geeignet für Probleme, für die es noch keinen Lösungsweg gibt [13]. die Brainstorming-Gruppe sollte mindestens fünf Personen einschließen [13]. Das Kollektionsverfahren wird durch eine Literaturrecherche und eine Analyse der am Markt vorhandenen Produkte unterstützt [13]. Nach der Findung der Lösungen sollen diese kombiniert werden, um eine Lösung des gesamten Systems herzuleiten. Dazu bietet sich der morphologische Kasten als eine gute Alternative an, um den Lösungsraum zu bilden [13].

Morphologischer Kasten

Anhand des morphologischen Kastens nach Zwicky werden die Probleme in Teilprobleme aufgeteilt. Die Lösungsmöglichkeiten für die Teilprobleme werden in Reihen eingetragen und kombiniert, um eine sinnvolle Gesamtlösung zu erhalten. Es werden hierbei die wichtigsten Ideen, die realisierbar sind und mit den Anforderungen übereinstimmen, zusammengefasst. [13]. Die Tabelle 3.6 veranschaulicht ein Beispielmodell der morphologische Kasten.

Abbildung 3.6.: Morphologischer Kasten zur Ermittlung möglicher Lösungskombinationen [14]



Konzept Bewertungsmethode

Um die beste Lösungsvariante zu finden, werden die drei dokumentierte Konzepte hinsichtlich verschieden Bewertungskriterien bewertet. Dazu wird eine Punktbewertungsskala von 0 bis 4 im Tabelle 3.1 zur Benotung verwendet. Außerdem wird jedes Kriterium von 1 bis 5 gewichtet, um die Wichtigkeit jedes Kriteriums zu betonen [14]. Die Tabelle 3.1 veranschaulicht die Punkteskala für das Bewertungssystem.

Tabelle 3.1.: Punkteskala für das Bewertungssystem [14]

| Grad der Annäherung | Punktzahl |
|---------------------|-----------|
| sehr gut (ideal) | 4 |
| gut | 3 |
| ausreichend | 2 |
| gerade noch tragbar | 1 |
| unbefriedigend | 0 |

Die Bewertungskriterien orientieren sich an den Anforderungen des Projektes und deren Prioritäten. Beispielsweise können dabei die Kosten, die Erfüllung der Hauptfunktionen des Projektes oder der Fertigungsaufwand berücksichtigt werden.

Die Summe der Punkte jedes Konzepts berechnet sich mit folgender Formel:

$$S_i = \sum G \cdot E \quad (3.1)$$

wobei das Kürzel G den Gewichtungsfaktor, E und i der Konzeptnummer die Einschätzung bzw. die Punktzahl darstellt. Die Wertigkeit der restlichen Konzepte wird auf der Grundlage des idealen Falls berechnet und folgendermaßen formuliert:

$$x_i = \frac{S_i}{S_{\text{ideal}}} \quad (3.2)$$

Wobei x_i die Wertigkeit des Konzepts, S_{ideal} die Summe der Punkte vom idealen Konzept, S_i die Summe der Punkte der Konzepte und i die Konzeptnummer ist. Das ideale Konzept erzielt eine technische Wertigkeit von 1, da es in allen Kriterien die Höchstpunktzahl erreicht [14].

Die Tabelle 3.2 zeigt ein Beispielsystem zur technischen Bewertung von drei Lösungskonzepten.

Tabelle 3.2.: Beispielsystem zur technischen Bewertung von drei Lösungskonzepten [14]

| Technische Anforderungen | G | Konzept 1 | | Konzept 2 | | Konzept 3 | | Ideal | |
|--------------------------|---|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-------|------------------------|
| | | E | G · E | E | G · E | E | G · E | E | G · E |
| Bewertungskriterium 1 | . | . | . | . | . | . | . | 4 | . |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| Bewertungskriterium n | . | . | . | . | . | . | . | 4 | . |
| Summe | - | | S_1 | - | S_2 | - | S_3 | - | S_{ideal} |
| Technischer Wert x | | | x_1 | | x_2 | | x_3 | | $x_{\text{ideal}} = 1$ |

Basierend auf den endgültigen Ergebnissen wird das Konzept mit der höchsten Bewertung als Endkonzept übernommen und weiterentwickelt.

3.4.3. Ausarbeiten

Ein wichtiger Teil der Ausarbeitungsphase ist die Durchführung aller wesentlichen Berechnungen, die im Projekt erforderlich sind, darunter die Festigkeitsberechnung für die Bauteile. Dies wird im kommenden Abschnitt verdeutlicht.

Festigkeitsberechnung

Um die Anforderungen an ein Bauteil zu erfüllen, seine Belastbarkeit und Beanspruchungsresistenz sicherzustellen sowie eine lange Lebensdauer und sichere Funktion zu gewährleisten, muss vor der Konstruktion für jedes Teil ein Festigkeitsnachweis erbracht werden. Der Festigkeitsnachweis erfolgt gemäß dem in Abbildung 3.7 dargestellten Berechnungsalgorithmus [14].

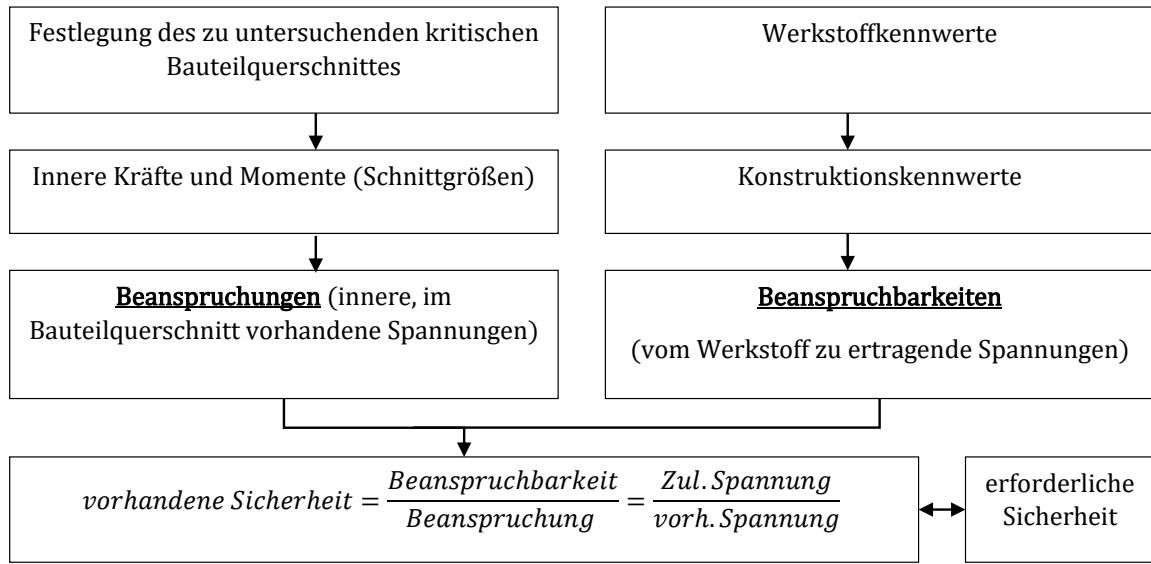


Abbildung 3.7.: Allgemeine Festigkeitsnachweis [14]

3.5. Marktanalyse

Die Analyse des Marktes für Plasma-Bearbeitungstische basiert auf umfangreichen Recherchen im Internet bei führenden Herstellern sowie in der Fachliteratur. Es zeigt sich, dass Schweißtische und Plasmaschneidtische als separate Produkte erhältlich sind, obwohl beide die gleiche Technologie verwenden. Wie bereits in Kapitel 3 erläutert, unterscheiden sich die Anforderungen für Plasma-Schweißen und -Schneiden erheblich, da es sich um unterschiedliche Fertigungsverfahren handelt.

- **Untersuchung von Schweißtischen:**

Ein typischer Schweißtisch besteht aus einem stabilen Rahmen, der oft mit höhenverstellbaren Beinen ausgestattet ist, um eine ergonomische Arbeitshöhe zu ermöglichen. Die Tischplatte ist in der Regel aus robustem Stahl gefertigt und verfügt über verschiedene Befestigungspunkte wie Nuten oder Bohrungen. Diese Befestigungspunkte dienen dazu, Werkzeuge und Werkstücke sicher zu fixieren und flexibel zu positionieren, was eine präzise und effiziente Bearbeitung ermöglicht. Moderne Schweißtische sind oft modular aufgebaut, sodass sie je nach Bedarf des Anwenders erweitert oder angepasst werden können. Hersteller wie Siegmund und Demmeler bieten eine breite Palette von Schweißtischen an, die durch ihre Langlebigkeit und Anpassungsfähigkeit überzeugen.

Auf dem Markt gibt es zwei Hauptarten von Schweißtischen: zweidimensionale und dreidimensionale Modelle. Zweidimensionale Schweißtische bestehen aus einer flachen Arbeitsfläche und eignen sich besonders für einfache Schweißarbeiten. Dreidimensionale Schweißtische hingegen verfügen über zusätzliche vertikale und manchmal auch diagonale Arbeitsflächen, die eine größere Flexibilität und Präzision bei komplexen Schweißkonstruktionen ermöglichen.

Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Schweißtischmodellen liegen in den verwendeten Materialien, den Abmessungen und dem Lochrastersystem. Das Material eines Schweißtisches bestimmt dessen Belastbarkeit. Die Abmessungen eines Schweißtisches variieren je nach Anwendungsbereich und Platzbedarf.

Ein wichtiger Aspekt des Lochrastersystems ist der Abstand zwischen den Löchern sowie deren Durchmesser. Das Lochrastersystem beeinflusst maßgeblich, welche Module und Befestigungstools mit dem Tisch kompatibel sind. Ein weiterer wichtiger Unterschied bei Schweißtischen ist die Grundkonstruktion, die je nach Anwendungsfall höhenverstellbar oder fest sein kann. Die Preise für einen Tisch mit den Abmessungen von 1500 mm x 1000 mm variieren bei den beiden genannten Händlern je nach den genannten Eigenschaften zwischen 1.400 und 5.500 EUR [15], [16].

Die Abbildung 3.8 zeigt einen Schweißtisch mit einer zweidimensionalen Platte des Herstellers Demmeler. Die Abbildung 3.9 zeigt einen Schweißtisch mit einer dreidimensionalen Platte und einem höhenverstellbaren Mechanismus des Herstellers Siegmund.



Abbildung 3.8.: Schweißtische von Demmeler [15]



Abbildung 3.9.: Mobiler Hubtisch [16]

- **Untersuchung von Plasmuschneidtischen:**

Plasmuschneidtische bestehen in der Regel aus einer stabilen Grundkonstruktion und einem Gittersystem, auf dem die Werkstücke positioniert werden. Dieses Gittersystem bietet eine stabile Unterstützung für die zu schneidenden Materialien und ermöglicht gleichzeitig die effiziente Ableitung von Schneidabfällen.

Ein wesentlicher Aspekt von Plasmuschneidtischen ist die Form der Lamellen. Diese können unterschiedliche Formen wie verzahnte, gerade oder gebogene Lamellen aufweisen, erfüllen jedoch alle die gleiche Funktion. Sie bieten eine zuverlässige Auflagefläche für das Material und können bei Abnutzung problemlos ausgetauscht werden. Dieser Austauschmechanismus trägt zur Langlebigkeit und Wartungsfreundlichkeit der Schneidtische bei.

Plasmuschneidtische werden häufig als Teil einer kompletten Plasmuschneidanlage verkauft, die ein integriertes Plasmuschneidgerät enthält. Diese Anlagen sind meist CNC-gesteuert, was eine präzise und automatisierte Bearbeitung der Werkstücke ermöglicht. Die CNC-Steuerung erhöht die Effizienz und Genauigkeit des Schneidprozesses erheblich. Neben der Lamellenform unterscheiden sich Plasmuschneidtische auch in weiteren Merkmalen wie der Verfügbarkeit von Wasserkühlungssystemen. Solche Kühlungssysteme tragen dazu bei, die Schneidtische und das Werkstück während des Schneidprozesses kühl zu halten, was die Qualität des Schnitts verbessert und die Lebensdauer der Maschine verlängert.

Hersteller wie Hezinger und MESSER Cutting Systems bieten eine breite Palette von Plasmuschneidtischen an, die sich in Schneidkapazität und Automatisierungsgrad unterscheiden. Beim Preisvergleich von Plasmuschneidtischen war es schwierig, genaue Angaben zu finden, da die meisten dieser Produkte als vollständige Plasmuschneidanlagen inklusive CNC-Steuerung verkauft werden. Aus diesem Grund sind separate Preise für die Schneidtische oft nicht verfügbar.[17], [18], [19].

Die Abbildung 3.10 zeigt eine Plasmuschneidanlage mit geraden Lamellen des Herstellers Hezinger. Die Abbildung 3.11 zeigt einen Wasserschneidtisch mit verzahnten Lamellen des

Herstellers Beutingsystems.



Abbildung 3.10.: Plasmaschneider [19]



Abbildung 3.11.: Wasserschneidtisch [18]

3.6. Untersuchung des bestehenden Bearbeitungstisches

Der bestehende Tisch ist ein Metalltisch mit einem Gittersystem. Diese Gitter sind Teil des modularen Systems des Tisches und dienen als Positionierungshilfe für die Schweiß- und Plasmaschneidmodule. Dies bedeutet, dass die Fertigungsverfahren nicht direkt auf dem Tisch durchgeführt werden.

Eine Herausforderung bei diesem System ist, dass die exakte Positionierung der Schneid- und Schweißmodule aufgrund der ungenauen Passungen nicht eingehalten werden kann, weshalb die Werkobjektkoordinaten ständig neu berechnet werden müssen.

Ein wesentlicher Nachteil besteht darin, dass diese Module nur für Werkstücke mit kleinen Abmessungen geeignet sind, was die Fertigungsmöglichkeiten erheblich einschränkt, besonders

im Vergleich zur großen Fläche, die der Tisch tatsächlich einnimmt.

Ein weiteres Problem stellt die schwierige Reinigung des Tisches dar. Dies liegt einerseits an der niedrigen Höhe des Tisches und andererseits am Fehlen einer geeigneten Schublade zum Sammeln von Schmutz. Bei jeder Reinigung müssen die Werkstücke, Module und Gitter demontiert werden, um direkten Zugriff zu ermöglichen. Dies ist besonders in einem begrenzten Arbeitsraum sehr aufwendig und führt zusätzlich zum Verlust der exakten Werkstückkoordinaten.

Zusätzlich ist der Tisch nicht fest am Boden verankert, was dazu führt, dass durch Vibratoren und die Bedienung die Kalibrierung verloren geht. Dies resultiert in ungenauen Fertigungsresultaten und beeinträchtigt die Präzision der Arbeit.

Die Abbildung 3.12 zeigt den bestehenden Tisch sowie die zugehörigen Plamaschweiß- und -schneidmodule.

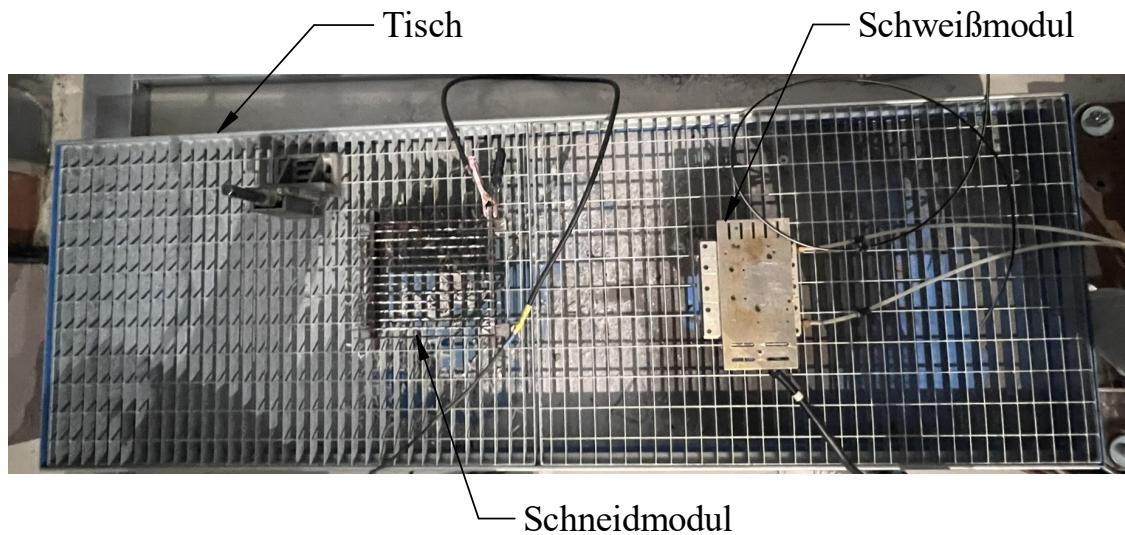


Abbildung 3.12.: Bestehende Bearbeitungstische

4. Methodische Produktentwicklungsprozesse der Bearbeitungstische

In diesem Kapitel werden die Schritte der VDI-Richtlinie 2221, die im Kapitel 3.4 vorgestellt wurden, angewendet, um die Realisierung des Bearbeitungstisches zu ermöglichen.

4.1. Projektplan

Um die strukturierte Durchführung der Arbeit zu gewährleisten, wurde ein Gantt-Diagramm erstellt. Dieser Plan bietet eine klare Übersicht über den Fortschritt und ermöglicht eine gezielte Aufgabenverteilung. Eine detaillierte Übersicht des Projektplans ist im Anhang A.4 zu finden.

4.2. Analysephase der Bearbeitungstische

Dieser Abschnitt befasst sich mit der Analysephase des Plasma-Bearbeitungstisches. Diese Phase umfasst die Erstellung der Anforderungsliste, die Blackbox-Darstellung und die Funktionsanalyse, welche für die Entwicklung des Bearbeitungstisches erforderlich sind.

4.2.1. Anforderungsliste

Basierend auf der Aufgabenstellung wurde für den Bearbeitungstisch eine Anforderungsliste erstellt, die in Tabelle 4.1 dargestellt ist. Dabei wurden die in Kapitel 3 beschriebenen Merkmale und Kriterien der Anforderungsliste berücksichtigt.

| Technische Universität Berlin Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme | | | Anforderungsliste für einen Bearbeitungstisch für zwei robotergestützte Plasma- Bearbeitungsverfahren | | Fachgebiet Beschichtungstechnik |
|--|------|------------------------------|--|----------------|------------------------------------|
| Nº | Prio | Änderungsdatum | Anforderungen | Verantwortlich | Bemerkungen / Begründung |
| Physikalisch-Technische Funktion | | | | | |
| 1 | F | 05.12.2023 | Stückzahl: 1 | Yassine | Aufgabenstellung |
| 2 | F | 02.01.2024 | Maximale Breite: 1000 mm | Yassine | Bemaßungen |
| 3 | F | 02.01.2024 | Maximale lange: 2500 mm | Yassine | Bemaßungen |
| 4 | F | 02.01.2024 | Maximale Höhe: 60 mm | Yassine | Bemaßungen |
| 5 | F | 02.01.2024 | Schweißplatte dicke mindestens 10 mm | Yassine | - |
| 6 | F | 05.12.2023 | Übernähme große Temperaturen | Yassine | - |
| 7 | F | 05.12.2023 | Umsetzung der Anforderungen für Plasmaschweißen | Yassine | Aufgabenstellung |
| 8 | F | 05.12.2023 | Umsetzung der Anforderungen für Plasmaschneiden | Yassine | Aufgabenstellung |
| 9 | F | 05.12.2023 | Präzise Fertigung | Yassine | Aufgabenstellung |
| 10 | F | 02.01.2024 | Niveau Korrektur Möglichkeiten | Yassine | - |
| 11 | F | 05.12.2023 | Minimale Tragfähigkeit: 200 kg | Yassine | - |
| 12 | F | 05.12.2023 | Kalibrierung von Werkzeugen | Yassine | - |
| 13 | W | 05.12.2023 | Modulare Konstruktion | Yassine | Aufgabenstellung |
| 14 | W | 05.12.2023 | Absauge Systeme mit dem Tisch verbinden | Yassine | - |
| 15 | W | 05.12.2023 | Abkühlung des Tisches | Yassine | - |
| Technologie | | | | | |
| 16 | F | 05.12.2023 | Verwendung von Normen | Yassine | - |
| 17 | F | 05.12.2023 | Methodische Produktentwicklung | Yassine | Aufgabenstellung |
| Wirtschaftlichkeit | | | | | |
| 18 | F | 05.12.2023 | Benutzung von Normteilen | Yassine | - |
| 19 | F | 05.12.2023 | Geringe Herstellungskosten | Yassine | - |
| 20 | W | 05.12.2023 | Nutzung vorhandene Ressourcen | Yassine | Aufgabenstellung |
| 21 | W | 05.12.2023 | Wartung mit vorhandenen Ressourcen | Yassine | Aufgabenstellung |
| 22 | W | 05.12.2023 | Herstellung in der Universitätswerkstatt | Yassine | Aufgabenstellung |
| Mensch-Produkt-Beziehung | | | | | |
| 23 | F | 05.12.2023 | Sicherheit | Yassine | - |
| 24 | F | 05.12.2023 | Einfache Wartung | Yassine | - |
| 25 | F | 05.12.2023 | Ergonomie | Yassine | - |
| F = Forderung - W = Wunsch - Prio = Priorität | | | | | |
| Datum: 18.06.2024 | | Erstellt von: Yassine Kraiem | | Version: | v1 |

Tabelle 4.1.: Anforderungsliste für die Bearbeitungstische für Plasma-Schweiß- und Schneidroboter

4.2.2. Black-Box-Darstellung

In diesem Abschnitt wird die Black-Box-Darstellung des Bearbeitungstisches basierend auf den Erkenntnissen aus Kapitel 3 vorgestellt. Die Abbildung 4.1 zeigt eine schematische Darstellung, die die Hauptfunktion des Systems sowie die Eingaben, Ausgaben, Emissionen und Immissionen des Bearbeitungstisches illustriert.

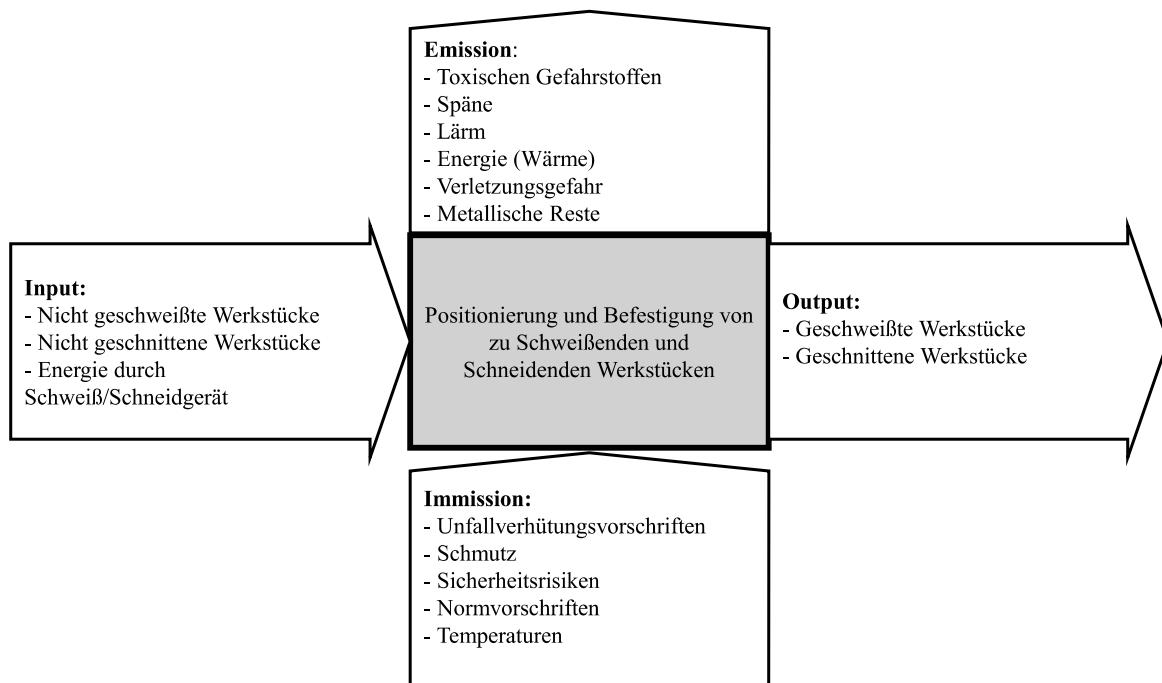


Abbildung 4.1.: Black-Box-Darstellung des Bearbeitungstisches

4.2.3. Funktionsanalyse

Basierend auf den im Kapitel 3 gesammelten Daten, einschließlich der Untersuchung des aktuellen Tisches, einer vertieften Marktanalyse und einer umfassenden Literaturrecherche, ergibt sich die Funktionsstruktur für das betrachtete System. Die Hauptfunktion und Teifunktionen wurden durch die Baumstruktur in Abbildung 4.2 dargestellt.

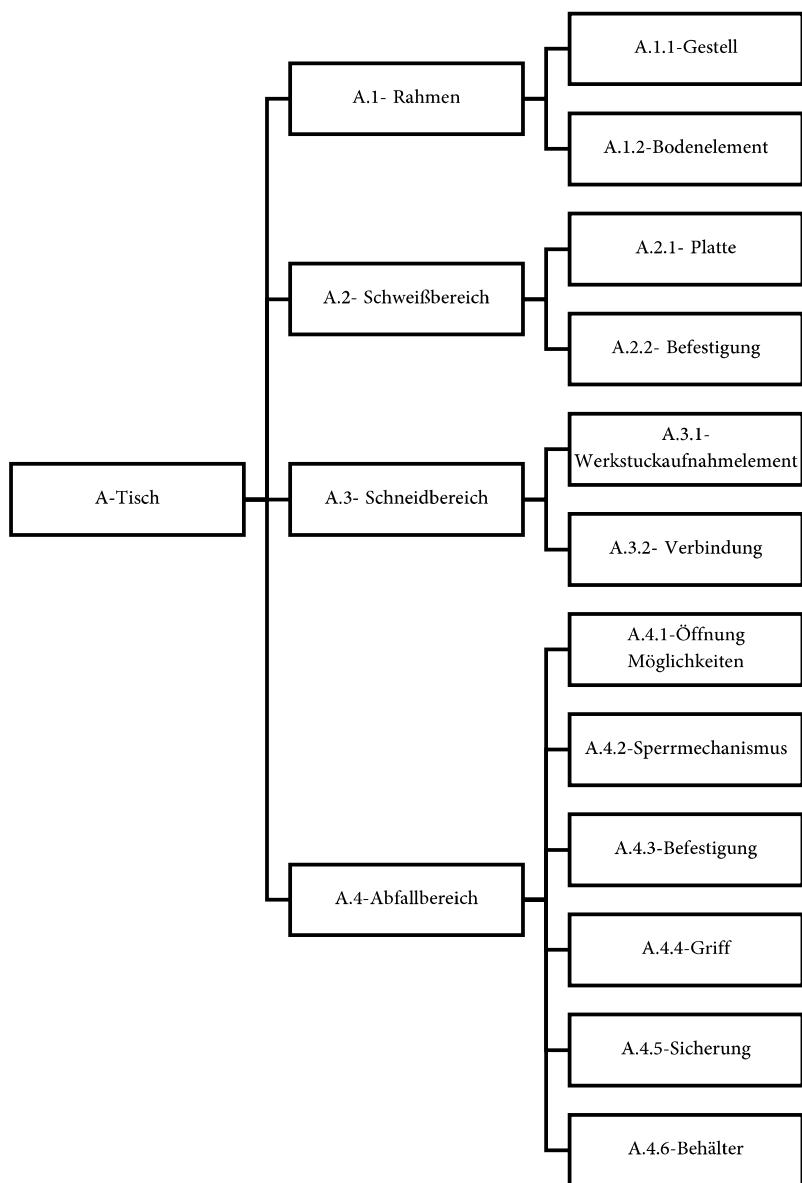


Abbildung 4.2.: Baumstruktur einer Plasma Bearbeitungstische

Auf Grundlage der vorangegangenen Baumstruktur und der durchgeführten Analysen ergibt sich die folgende Funktionsanalyse, die die Hauptfunktion und die Telfunktionen der Bearbeitungstische untersucht:

A. Tisch

Der Tisch als Ganzes erfüllt die Hauptfunktion der Positionierung und Befestigung von zu schweißenden und schneidendenden Werkstücken.

A.1 Rahmen

Der Rahmen stellt die Grundstruktur des Tisches dar und trägt die Hauptlast. Er gewährleistet Stabilität und Festigkeit.

- **A.1.1 Gestell**

- *Funktion:* Trägt das Gewicht der gesamten Tischkonstruktion und bietet eine stabile Basis.
 - *Wichtige Eigenschaften:* Stabilität, Festigkeit, Materialbeständigkeit.

- **A.1.2 Bodenelement**

- *Funktion:* Kontaktfläche zum Boden, sorgt für eine rutschfeste und stabile Position des Tisches.
 - *Wichtige Eigenschaften:* Rutschfestigkeit, Einstellbarkeit.

A.2 Schweißbereich

Der Schweißbereich umfasst die Arbeitsfläche und die Elemente, die speziell für Schweißarbeiten geeignet sind.

- **A.2.1 Platte**

- *Funktion:* Bietet eine robuste und hitzebeständige Arbeitsfläche für Schweißarbeiten.
 - *Wichtige Eigenschaften:* Hitzebeständigkeit, Robustheit, ebenmäßige Oberfläche.

- **A.2.2 Befestigung**

- *Funktion:* Sichert die Arbeitsplatte auf das Rahmen.

A.3 Schneidbereich

Der Schneidbereich umfasst die Elemente, die speziell für Schneidarbeiten ausgelegt sind.

- **A.3.1 Werkstückaufnahmeelement**

- *Funktion:* Hält und positioniert Werkstücke während des Schneidens.
 - *Wichtige Eigenschaften:* Stabilität, Präzision, Anpassungsfähigkeit an verschiedene Werkstücke.

- **A.3.2 Verbindung**

- *Funktion:* Verbindet die Werkstückaufnahmeelemente mit dem Tisch.
 - *Wichtige Eigenschaften:* Festigkeit, Zuverlässigkeit, Anpassungsfähigkeit.

A.4 Abfallbereich

Die Abfallbereiche umfasst verschiedene Komponenten, die zur Sammlung und Handhabung von Spänen und Abfallmaterialien dienen, die durch die Fertigungsverfahren entstehen.

- **A.4.1 Öffnungsmöglichkeiten**

- *Funktion:* Erlauben den Zugang zum Innenraum des Behälters, um Späne einfach zu entsorgen und zu entnehmen.
 - *Wichtige Eigenschaften:* Benutzerfreundlichkeit, Sicherheit.
- **A.4.2 Sperrmechanismus**
 - *Funktion:* Sichert den Behälterinhalt gegen ungewolltes Öffnen, um Verschütten von Spänen zu vermeiden.
 - *Wichtige Eigenschaften:* Sicherheit, Zuverlässigkeit, Robustheit.
- **A.4.3 Befestigung**
 - *Funktion:* Verbindet den Behälter sicher mit dem Tisch, um Stabilität während des Betriebs zu gewährleisten.
 - *Wichtige Eigenschaften:* Stabilität, einfache Montage und Demontage.
- **A.4.4 Griff**
 - *Funktion:* Ermöglicht das einfache Tragen und Bewegen des Behälters, insbesondere zum Entleeren der Späne.
 - *Wichtige Eigenschaften:* Ergonomie, Stabilität, Komfort.
- **A.4.5 Sicherung**
 - *Funktion:* Zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen zur Vermeidung von Unfällen.
 - *Wichtige Eigenschaften:* Sicherheit, Robustheit, Zuverlässigkeit.
- **A.4.6 Behälter**
 - *Funktion:* Sammlung von Spänen und Abfallmaterialien, die durch die Fertigungsverfahren entstehen.
 - *Wichtige Eigenschaften:* Sicherheit, Robustheit, Zuverlässigkeit.

4.3. Konzeptionsphase der Bearbeitungstische

Nachdem die Analysephase abgeschlossen und die Haupt- sowie Teilfunktionen des Systems sowie deren Anforderungen identifiziert wurden, beginnt nun die Konzeptionsphase der Bearbeitungstische. Diese Phase umfasst, wie in Kapitel 3.4.2 beschrieben, die Entwicklung verschiedener Lösungsvorschläge und deren Bewertung, um ein endgültiges Konzept auszuwählen.

4.3.1. Bildung von Lösungskonzepten

Die Bildung der Lösungskonzepte erfolgt basierend auf der Funktionsanalyse und der Anforderungsliste sowie unter Anwendung der im Kapitel 3.4.1 erwähnten Ideenfindungsmethode. Brainstorming ist für individuelle Arbeiten nicht geeignet und eher für Probleme ohne bestehende Lösungen gedacht. Das Kollektionsverfahren hingegen ist hier passend, da es eine Literaturrecherche und die Analyse der im Markt vorhandenen Produkte einbezieht. Die Teilfunktionen wurden in den morphologischen Kästen eingetragen, ebenso wie alle möglichen Teillösungen. Die Kombination der Teillösungen hat sechs Lösungskonzepte hervorgebracht. Die besten drei Konzepte werden dokumentiert und bewertet. Die Tabelle 4.2 stellt einen sortierten morphologischen Kasten der besten drei gefundene Lösungen dar, um die Teillösungen jedes Lösungskonzepts besser zu veranschaulichen. Eine unsortierte Version sowie eine Version mit den sechs gesuchten Lösungen befinden sich im Anhang A2 bzw. A3.

Tabelle 4.2.: Morphologischer Kasten

| | | Konzepte | | |
|-------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Funktionen | Teilfunktionen | Lösung 1 | Lösung 2 | Lösung 3 |
| 1- Rahmen | Material form | Aluminiumprofile | Profilstahlrohr | Aluminiumprofile |
| | Verbindungselement | Verschraubt | Geschweißt | Verschraubt |
| | Bodenelemente | Verstellbare Höhe | Verstellbare Höhe | Verstellbare Höhe |
| 2- Schweißbereich | Schweißtisch Platte | Lochraster Platte | Lochraster Platte | Lochraster Platte |
| | Verbindungselement | Verschraubt | Verschraubt | Verschraubt |
| 3- Schneidbereich | Werkstuckaufname-element | Verzähnte Lamellen | Gerade Lamellen | Punktuelle Kontakt |
| | Verbindung | Formschlüssige Verbindungen | Formschlüssige Verbindungen | Formschlüssige Verbindungen |
| 4- Abfall Bereich | Fertigung | Geschweißt | Gebogen und geschweißt | Gebogen und geschweißt |
| | Form | Trapezförmig | Rechteckig | Rechteckig |
| | Öffnung Möglichkeiten | Scharniere | Scharniere | Scharniere |
| | Sperrmechanismus | Rastbolzen | Steckbolzen | Rastbolzen |
| | Griff | Bügelgriffe | Bügelgriffe | Bügelgriffe |
| | Sicherung | Halteseil | Kette | Halteseil |

4.3.2. Konzeptbeschreibung

Der morphologische Kasten stellt zahlreiche Lösungsmöglichkeiten dar. Die werden aber nicht alle dokumentiert, sondern werden nur drei gewählt und im Folgenden dokumentiert, die den

Fokus auf verschiedenen Anforderungen stellen und Kompromisse dazwischen schließen.

Konzept 1

Das erste Konzept besteht hauptsächlich aus einem Rahmen, einem Schneidebereich und einem Schweißbereich. Der Rahmen wird aus Aluprofilen hergestellt und mit höhenverstellbaren Füßen ausgestattet. Der Schneidebereich besteht aus einem Lamellenbett. Die Lamellen mit Zähnen haben eine formschlüssige Verbindung mit dem Bett. Das Bett wird dann am Rahmen befestigt. Der Schweißbereich wird durch eine Platte mit einem Lochraster definiert. Der Abfallbehälter wird durch ein Scharnier und ein Rastbolzen geöffnet und geschlossen. Zusätzlich ist der Abfallbehälter mit einem Haltseil gesichert, um im Falle eines Versagens des Sperrmechanismus oder eines Bedienungsfehlers Unfälle zu verhindern. Das erste Konzept ist im Abbildung 4.3 dargestellt.

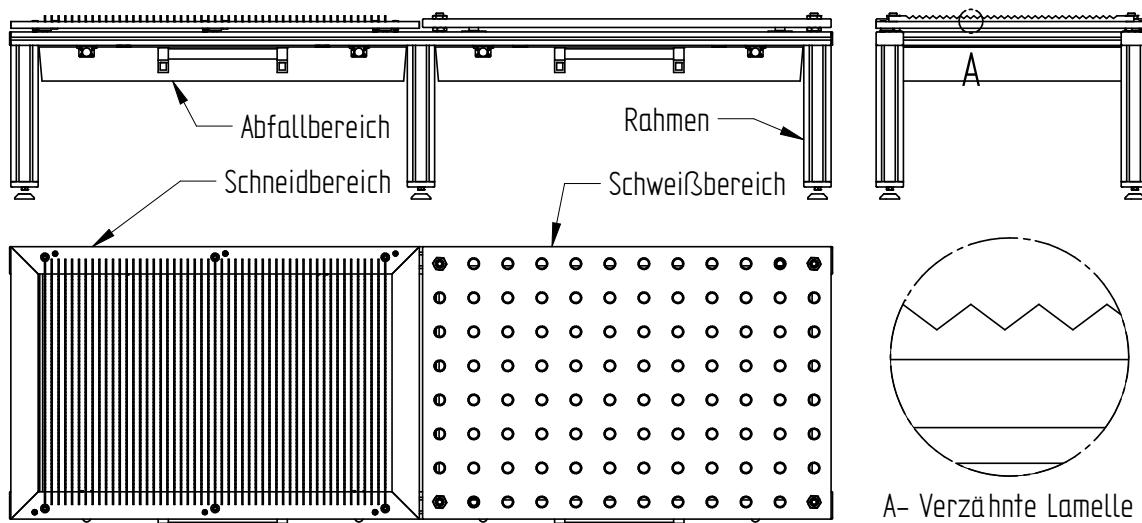


Abbildung 4.3.: Schematische Darstellung von Konzept 1

Konzept 2

Der zweite Konzeptentwurf hat die gleiche Struktur wie der erste, allerdings gibt es einige Unterschiede in der Konstruktion. Der Rahmen wird aus Profilstahlrohr gefertigt, was eine Schweißkonstruktion erforderlich macht. Sowohl der Schweiß- als auch der Schneidbereich sind ähnlich gestaltet wie im ersten Konzept. Die Unterschiede liegen darin, dass die Werkstückaufnahmeelemente aus geraden Lamellen bestehen statt der verzahnten. Der Abfallbehälter ist mit einer Kette gesichert, um im Falle eines Versagens des Sperrmechanismus oder eines Bedienungsfehlers Unfälle zu verhindern. Anstatt eines Rastbolzens würde hier ein Steckbolzen verwendet. Das zweite Konzept ist im Abbildung 4.4 dargestellt.

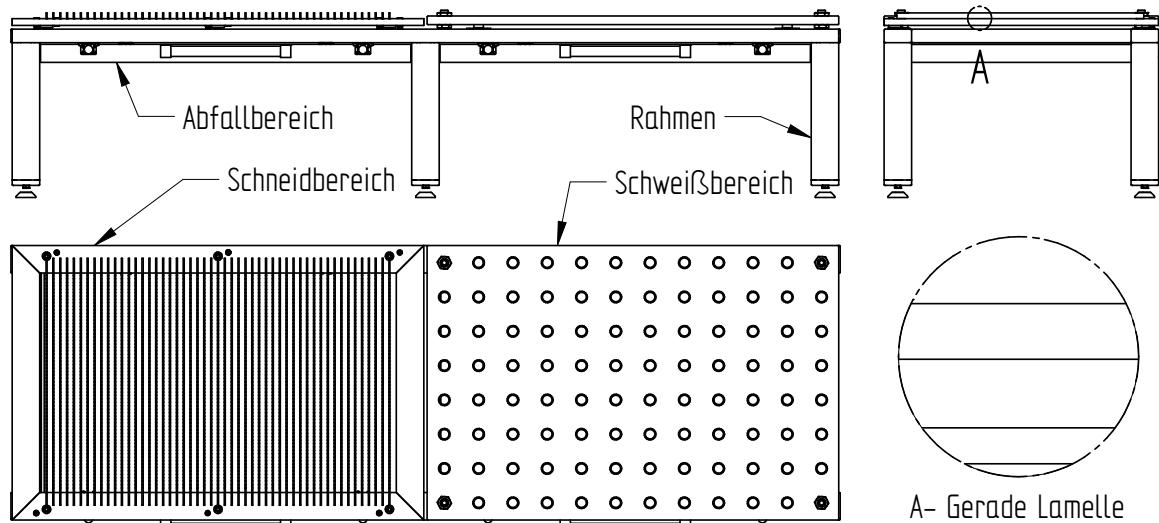


Abbildung 4.4.: Schematische Darstellung von Konzept 2

Konzept 3

Im Gegensatz zu allen vorherigen Konzepten besteht das dritte Konzept nur aus einem Bereich. Es besteht hauptsächlich aus einem Rahmen, einem Schweißbereich und einem Behälter. Der Schneidebereich wird durch kleine Module realisiert, die einen punktuellen Kontakt zum Werkstück haben. Diese werden in die Löcher in der Platte eingeführt und gewährleisten so eine sichere Positionierung der Werkstücke. Der Abfallbehälter wird durch ein Scharnier und ein Rastbolzen geöffnet und geschlossen und ist mit einem Halteseil gesichert, falls der Sperrmechanismus versagt oder ein Bedienungsunfall geschieht.

Das dritte Konzept ist im Abbildung 4.5 dargestellt.

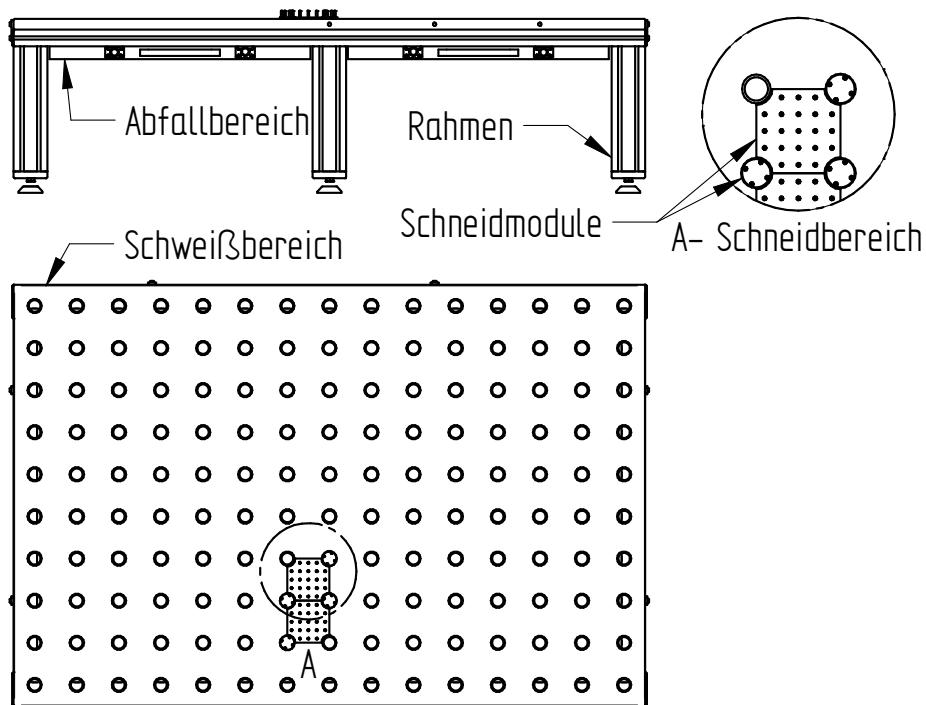


Abbildung 4.5.: Schematische Darstellung von Konzept 3

4.3.3. Bewertung der Lösungskonzepte

Nachdem eine detaillierte Beschreibung der Konzepte erfolgt ist, werden in diesem Abschnitt die relevanten Bewertungskriterien festgelegt und die Konzepte anhand der in Kapitel 3.4 beschriebenen Methode bewertet.

Bewertungskriterien

Im Folgenden werden die einzelnen Kriterien, nach denen bewertet wird, vorgestellt. Dabei wird die Gewichtung der Punkte begründet und die Punktevergabe für die Konzepte erklärt. In diesem Projekt wird versucht, so viel wie möglich selbst hergestellte Teile zu verwenden und auch die bereits verfügbaren Materialien einzubeziehen. Daher werden die Bewertungskriterien daran orientiert:

- **Fertigungsaufwand:** Der Fertigungsaufwand bezieht sich auf die Komplexität der Teile sowie die Möglichkeit, die vorhandene Fertigungstechnik in der Werkstatt zu verwenden.
- **Kosten:** Innerhalb des Projekts liegt ein hoher Wert darauf, eine kosteneffiziente Lösung zu schaffen.
- **Montageaufwand:** Der Montageaufwand bezieht sich auf die Anzahl der Teile, ihr Gewicht und ihre Abmessungen sowie den verfügbaren Arbeitsraum, in dem die Montage

durchgeführt wird.

- **Sicherheit:** Dieses Kriterium gewährleistet, dass das finale Produkt die wesentlichen Sicherheitsmaßnahmen zum Schutz des Verbrauchers erfüllt und eine ergonomische Erfahrung gewährleistet.
- **Funktionalität:** Diese Kriterien bewerten, wie gut das Produkt seine Hauptfunktion erfüllt.

Technische Bewertung

Die Konzepte wurden gemäß der im Kapitel 3.4.2 beschriebenen Bewertungsmethode eingehend analysiert.

Das erste und zweite Konzept zeichnen sich durch großzügige Arbeitsflächen aus, die es ermöglichen, Werkstücke direkt auf dem Tisch zu bearbeiten. Im Gegensatz dazu erfordert das dritte Konzept, dass der Benutzer die Auflageflächen für das Plasmaschneiden manuell positioniert. Daher erhielten das erste und zweite Konzept eine Bewertungsnote von 4 für das Kriterium 'Funktionalität', da sie die Hauptaufgabe des Tisches besser erfüllen. Das dritte Konzept erhielt eine Bewertungsnote von 3.

Jedoch sind das erste und zweite Konzept komplexer in Bezug auf die Anzahl der Teile. Im Gegensatz dazu besteht das dritte Konzept hauptsächlich aus weniger Teilen und ist kleiner dimensioniert. Zusätzlich ist die verzahnte Lamellenform im Konzept 1 komplex und kann nicht lokal gefertigt werden. Daher erhält das erste Konzept eine Bewertungsnote von 2 und das zweite Konzept eine Bewertungsnote von 3 für das Kriterium 'Fertigungsaufwand', während das dritte Konzept eine Bewertungsnote von 4 erhält.

Aufgrund des höheren Materialeinsatzes und der erhöhten Anzahl an Teilen erhielt das erste Konzept eine Bewertungsnote von 3, das zweite Konzept eine Bewertungsnote von 3 und das dritte Konzept eine Bewertungsnote von 4 für das Kriterium 'Kosten'.

Der 'Montageaufwand' für die ersten beiden Konzepte ist im Vergleich zum dritten Konzept höher, wodurch sie eine Bewertungsnote von 3 im Vergleich zu einer Bewertungsnote von 4 für das dritte Konzept erhielten.

Die 'Wartung' des ersten Konzepts gestaltet sich aufgrund der ungewöhnlichen Form der Lamellen und der externen Bestellung komplexer im Vergleich zu den anderen beiden Konzepten. Daher erhielt das erste Konzept eine Bewertungsnote von 3, während das zweite und dritte Konzept jeweils eine Bewertungsnote von 4 erhielten.

Die abschließende Bewertung der drei Konzepte ist in der folgenden Tabelle detailliert dargestellt. Alle Konzepte wurden mit Sicherheitsmaßnahmen ausgestattet und erhielten daher eine Bewertungsnote von 4 in diesem Bereich.

Die Tabelle 4.3 veranschaulicht die Ergebnisse der technischen Bewertung der drei ausgewählten Lösungskonzepte.

Tabelle 4.3.: Technische Bewertung

| Technische Anforderungen | G | Konzept 1 | | Konzept 2 | | Konzept 3 | | Ideal | |
|--------------------------|---|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-------|-------|
| | | E | G · E | E | G · E | E | G · E | E | G · E |
| Funktionalität | 5 | 4 | 20 | 4 | 20 | 3 | 15 | 4 | 20 |
| Fertigungsaufwand | 5 | 2 | 10 | 3 | 15 | 4 | 20 | 4 | 20 |
| Kosten | 4 | 3 | 12 | 3 | 12 | 4 | 16 | 4 | 16 |
| Wartungsaufwand | 3 | 3 | 9 | 4 | 12 | 4 | 12 | 4 | 12 |
| Sicherheit | 3 | 4 | 12 | 4 | 12 | 4 | 12 | 4 | 12 |
| Montageaufwand | 2 | 3 | 6 | 3 | 6 | 4 | 8 | 4 | 8 |
| Summe | - | 69 | | 77 | | 83 | | 88 | |
| Technischer Wert x | | 0.78 | | 0.88 | | 0.94 | | 1.00 | |

Das Bewertungssystem hat ergeben, dass alle drei Konzepte gute Lösungen darstellen. Je- doch zeigt das dritte Konzept die geringste Abweichung vom idealen Konzept und übertrifft somit die anderen beiden. Aus diesem Grund wird das Projekt auf der Grundlage des dritten Konzepts weiterentwickelt

4.4. Entwurfsphase der Bearbeitungstische

Nachdem die Konzepte bewertet wurden und eine Entscheidung für ein Konzept getroffen wurde, beginnt nun die Entwurfsphase gemäß den in Kapitel 3.4 erwähnten Schritten. Ein Vorentwurf des Bearbeitungstisches wurde bereits bei der Konzeptvorstellung unter Abbildung 4.5 erstellt. Vor der Erstellung des Gesamtentwurfs des Systems müssen zunächst die Abmessungen des Tisches sowie der verfügbare Arbeitsraum untersucht werden. Dies wird im folgenden Abschnitt behandelt.

4.4.1. Bestimmung der Bemaßungen

Zusätzlich zur Untersuchung des verfügbaren Arbeitsraums und seiner Maße ist es entscheidend, die räumlichen Gegebenheiten zu berücksichtigen, um eine effiziente Konstruktion zu schaffen. Die Montage des Tisches sollte so gestaltet werden, dass sie reibungslos im vorhandenen Raum erfolgen kann, ohne dass eine Demontage der Roboter erforderlich ist. Dies erfordert eine präzise Planung, um die räumlichen Anforderungen optimal zu nutzen. Die Abbildung 4.6 stellt die Roboterzelle dar:

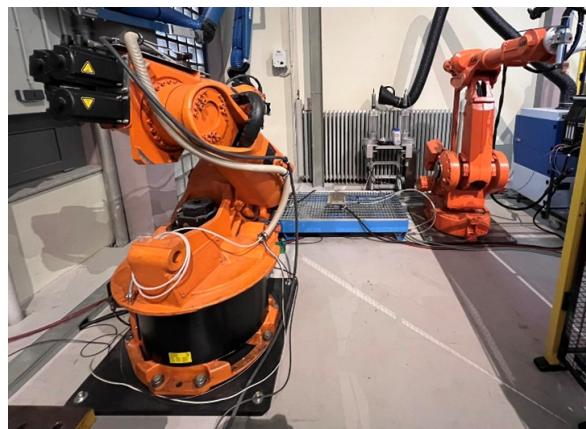


Abbildung 4.6.: Roboterzelle

Die Roboterzelle sowie die Positionen der Roboter wurden sorgfältig gemessen. Eine schematische Darstellung der Roboterzelle und der Anordnung der Roboter befindet sich im Abbildung 4.7.

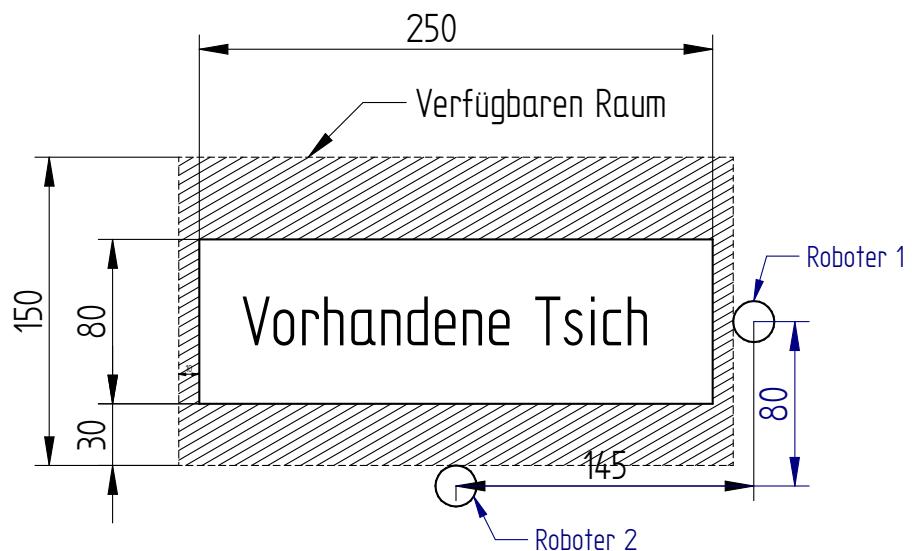


Abbildung 4.7.: Schematische Darstellung des verfügbaren Arbeitsraums

Des Weiteren ist es von wesentlicher Bedeutung, die maximale Reichweite jedes Roboters eingehend zu analysieren. Die Bewegungssachsen der Roboter müssen gründlich untersucht werden, um den maximalen Arbeitsbereich jedes Roboters zu berechnen. Diese Überlegungen spielen eine entscheidende Rolle bei der Festlegung der Positionierung des Tisches und der Optimierung der Arbeitsumgebung für die reibungslose Interaktion der Roboter. Die Reichweite von Roboter 1 wurde den Herstellerangaben entnommen und ist in Abbildung 4.8 und 4.9 dargestellt. Für Roboter 2 wurde die Reichweite manuell ermittelt, da keine technische

Dokumentation verfügbar ist.

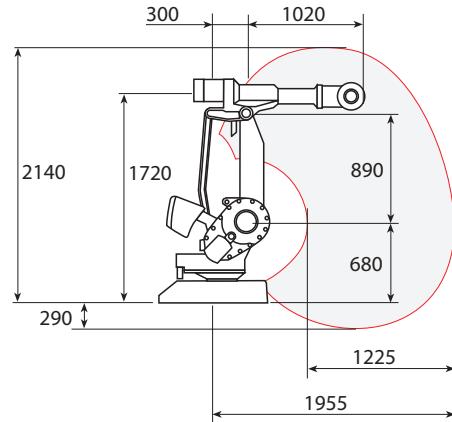


Abbildung 4.8.: Arbeitsbereich IRB 4400/60 [20]

In Anbetracht dieser Faktoren wird die Entwicklung einer Konstruktion angestrebt, die nicht nur den Anforderungen des verfügbaren Raums gerecht wird, sondern auch eine effektive Nutzung der Roboterreichweiten und Bewegungsmöglichkeiten ermöglicht, um deren Kollisionen zu vermeiden. Durch diese ganzheitliche Betrachtung soll eine Lösung geschaffen werden, die sowohl effizient als auch praxisgerecht ist. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Bereitstellung eines Arbeitsraums für Reparaturen, Kontrollen und Reinigungen. Die Konstruktion sollte so gestaltet sein, dass diese Aktivitäten effizient durchgeführt werden können, ohne den laufenden Betrieb zu beeinträchtigen. Die Abbildung 4.9 zeigt die Roboterzelle, die Reichweiten beider Roboter sowie den für den Anwender vorgesehenen Raum.

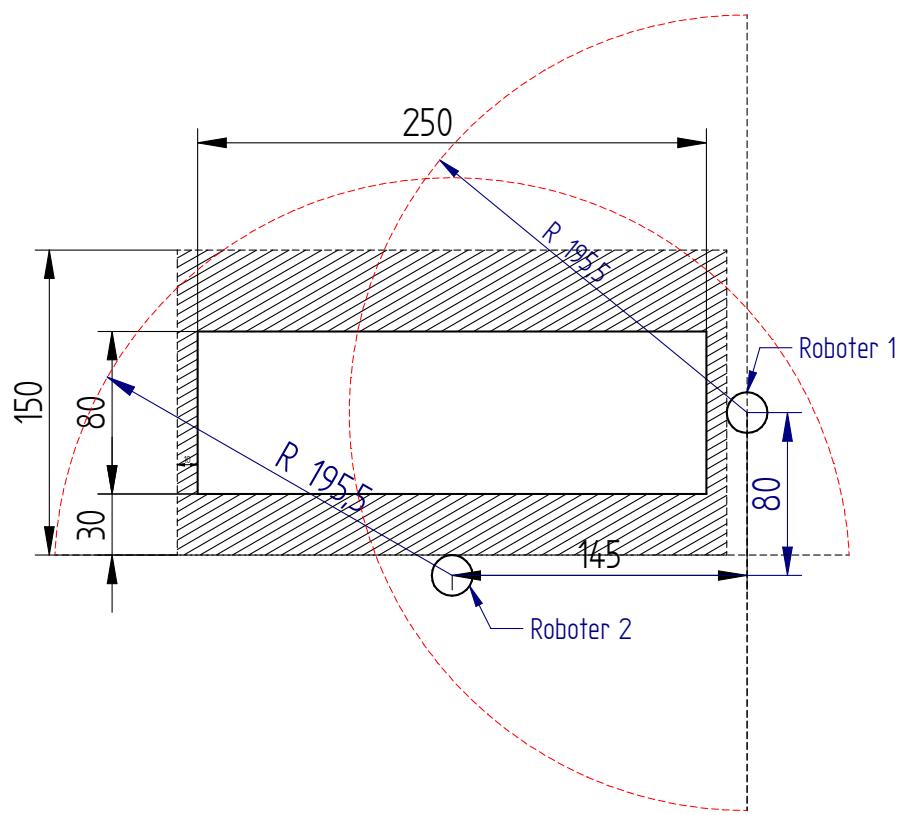


Abbildung 4.9.: Schematische Darstellung der Roboterzelle

Somit kann der Tisch maximal die folgenden Abmessungen haben: 2500 mm Länge, 1000 mm Breite und 600 mm Höhe.

4.4.2. Gesamtentwurf

Basierend auf den festgelegten maximalen Abmessungen und dem in Abbildung 4.5 dargestellten Vorentwurf wurde die folgende Lösung entwickelt. Bei der Erstellung des Gesamtentwurfs lag der Fokus darauf, eine kostengünstige Lösung zu erreichen. Hierbei wurden zunächst vorhandene Materialien berücksichtigt und die verfügbaren Fertigungsmöglichkeiten genutzt. Falls die Herstellung eigener Teile nicht möglich war, wurden diese bei spezifischen Händlern beschafft und das Konzept entsprechend umgesetzt. Die Abbildungen 4.12 und 4.10 stellen den Gesamtentwurf dar. Die Tabelle 4.4 stellt die wichtigen Bereiche und Teile des Tisches dar. Der Gesamtentwurf lässt sich als eine realisierbare Lösung darstellen, insbesondere in Bezug auf die verwendeten Materialien, Teile und Kosten. Allerdings müssen vor der Produktion des Tisches verschiedene Berechnungen durchgeführt werden, um die Grundstruktur und die Belastbarkeit des Tisches zu überprüfen und zu untersuchen. Dies erfolgt im nächsten Abschnitt.

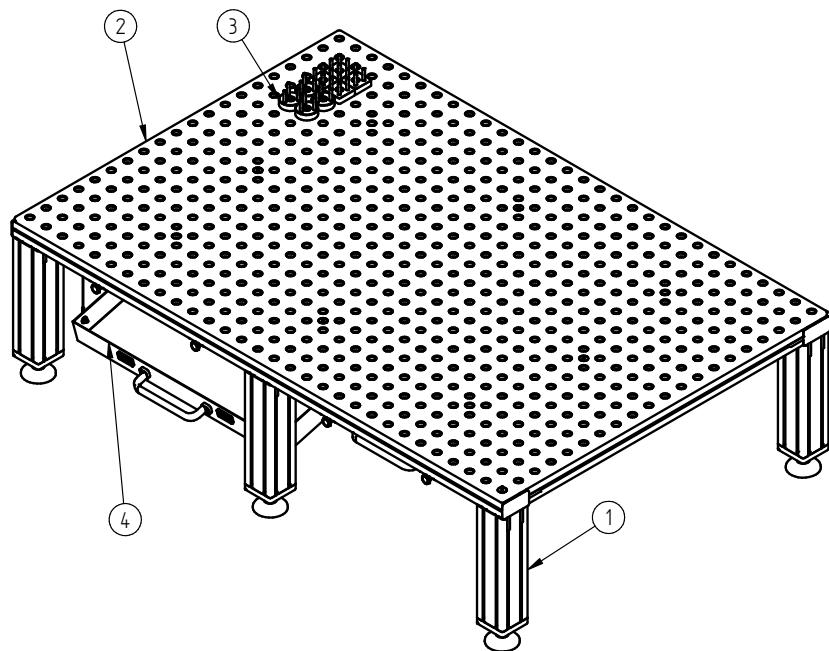


Abbildung 4.10.: Gesamtentwurf des Plasmabearbeitungstisches

Tabelle 4.4.: Hauptbereiche der Tische

| Teilenummer | Bezeichnung |
|-------------|------------------------|
| 1 | Rahmen |
| 2 | Schweißplatte |
| 3 | Plasmaschneidaufnahmen |
| 4 | Behälter |

Um mehr Flexibilität und Modularität beim Schneidvorgang zu gewährleisten, wurden zwei Varianten der Plasmaschneidaufnahmen entwickelt. Eine runde Variante mit drei Stiften ist in Abbildung 4.11 dargestellt, und eine eckige Variante mit vier Stiften ist in Abbildung 4.12 dargestellt.

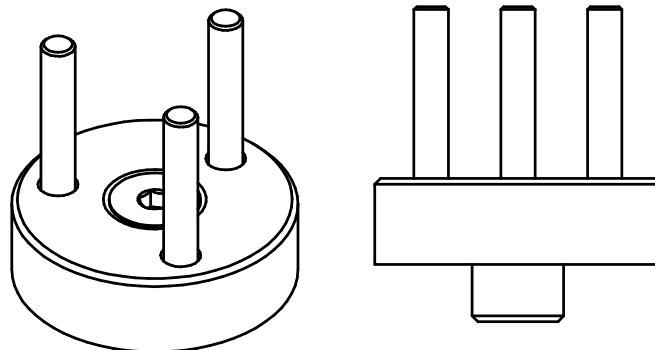


Abbildung 4.11.: Gesamtentwurf der runden Plasmaschneidaufnahmen

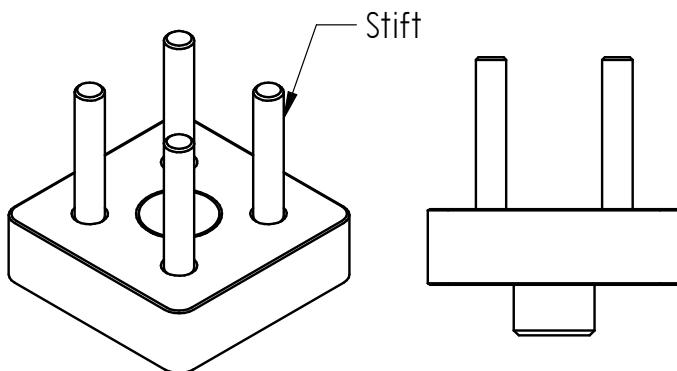


Abbildung 4.12.: Gesamtentwurf der eckigen Plasmaschneidaufnahmen

4.5. Ausarbeitsphase der Bearbeitungstische

Dieser Abschnitt stellt den letzten Teil des in Kapitel 3.4 beschriebenen VDI 2221 dar. In diesem Kapitel werden die notwendigen Berechnungen durchgeführt, um das entworfene Konzept zu überprüfen und zu validieren. Das entworfene Konzept wird dann auf Basis der Berechnungen und deren Ergebnisse aktualisiert und angepasst. Im kommenden Abschnitt werden die einzelnen Bauteile des Bearbeitungstisches ausgelegt und untersucht.

4.5.1. Berechnungen

Ein Festigkeitsnachweis ist erforderlich, um sicherzustellen, dass der Tisch den vorgesehenen Belastungen und Beanspruchungen standhält. Dieser Nachweis ist entscheidend, um die Sicherheit und Langlebigkeit des Tisches zu gewährleisten. Ohne einen Festigkeitsnachweis könnten unerkannte Schwachstellen zu Materialversagen und damit zu potenziellen Unfällen führen. Darüber hinaus hilft der Festigkeitsnachweis, die optimale Materialauswahl und Konstruktionsmethoden zu bestimmen. Der Festigkeitsnachweis erfolgt nach dem in Abschnitt

3.4.3 erwähnten Berechnungsalgorithmus.

Da die Berechnungen für das gesamte System aufgrund der Vielfalt an Teilen, der großen Anzahl und der komplizierten Geometrie sehr anspruchsvoll sind, könnten sie mithilfe einer Finite-Elemente-Methode (FEM) Software durchgeführt werden. Um die Ergebnisse der FEM-Simulation zu validieren und sicherzustellen, dass diese mit dem vorgestellten Berechnungsalgorithmus übereinstimmen, wurde zunächst eine Proberechnung manuell an einem trivialen Beispiel durchgeführt und anschließend mit den Ergebnissen aus der FEM verglichen. Die FEM-Simulationen erfolgten mit der Belastungsanalyse-Funktion der Software Autodesk Inventor Professional 2024.

Rechnermodell für die Festigkeitsberechnungen

Im folgenden Beispiel unter Abbildung 4.13 wird ein fest eingespannter Stahlstab mit rundem Querschnitt berechnet. Der Stab wird mit einer Kraft $F = 100 \text{ N}$ belastet. Die dazugehörigen Eigenschaften befinden sich in Tabelle 4.5.

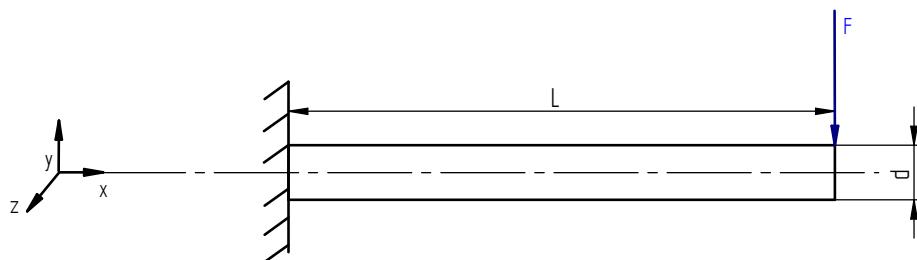
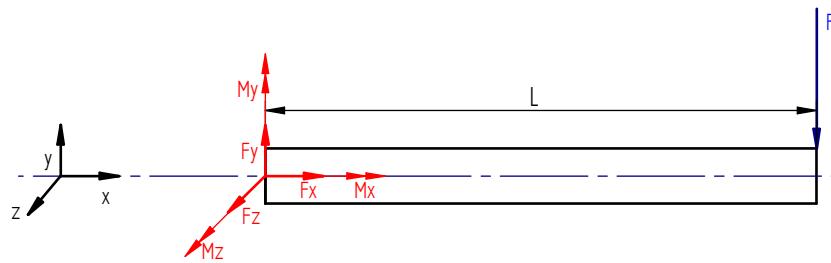


Abbildung 4.13.: Schematische Darstellung des Beispielsystems

Tabelle 4.5.: Informationen zum Beispielsystem

| Bezeichnung | Formelzeichen | Zahlenwert |
|--------------|-----------------|------------|
| Durchmesser | d | 10 mm |
| Länge | L | 100 mm |
| Werkstoff | Stahl | - |
| Streckgrenze | $R_e(R_{p0.2})$ | 207 MPa |
| Kraft | F | 100 N |

Zuerst müssen die Auflagerkräfte und Momente berechnet werden. Die Abbildung 4.14 stellt einen Freischnitt des Systems dar.

**Abbildung 4.14.:** Freischnitt des Beispielsystems

Nach dem Kräftegleichgewicht:

$$\sum_i \vec{F}_i = \vec{0} \quad (4.1)$$

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -F \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Es ergeben sich folgende Werte:

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ F \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 100 \text{ N} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Nach dem Momentengleichgewicht gilt:

$$\sum \vec{M}_F = \vec{0} \quad (4.4)$$

$$\begin{pmatrix} L \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ -F \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} M_{Fx} \\ M_{Fy} \\ M_{Fz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

Es ergeben sich folgende Werte:

$$\begin{pmatrix} M_{Fx} \\ M_{Fy} \\ M_{Fz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ L \cdot F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 10 \text{ Nm} \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Jetzt werden die Schnittlasten für das System berechnet. Es handelt sich um ein einfaches System, das nur eine Kraft F aufweist, daher wird nur ein Bereich für die Schnittlasten benötigt. Es wird das negative Schnittufer für den Bereich verwendet. Die Abbildung 4.15 stellt die Schnittlastendarstellung im ersten Bereich dar.

Bereich 1: $0 \leq x \leq L$

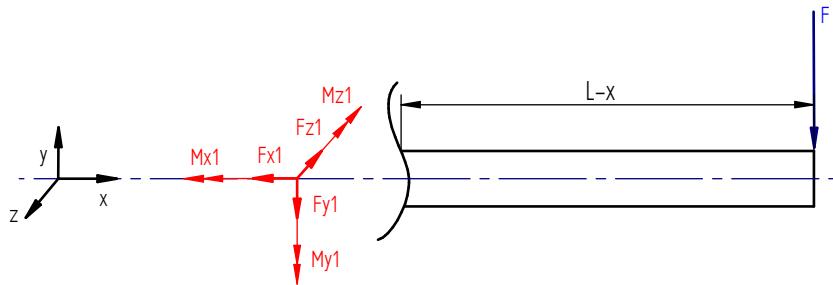


Abbildung 4.15.: Schnittlastendarstellung im ersten Bereich

Nach dem Kräftegleichgewicht gilt:

$$\sum_i \vec{F}_i = \vec{0} \quad (4.7)$$

$$\begin{pmatrix} -F_{x1} \\ -F_{y1} \\ -F_{z1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -F \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

Es ergeben sich folgende Werte:

$$\begin{pmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ F_{z1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -F \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -100 \text{ N} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

Nach dem Momentengleichgewicht gilt:

$$\sum \vec{M}_x = \vec{0} \quad (4.10)$$

$$\begin{pmatrix} L - x \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ -F \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -M_{x1} \\ -M_{y1} \\ -M_{z1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

Es ergeben sich folgende Werte:

$$\begin{pmatrix} M_{x1} \\ M_{y1} \\ M_{z1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -(L - x) \cdot F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ (x - 100 \text{ mm}) \cdot 100 \text{ N} \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

Damit können die schittlasen dargestellt werden:

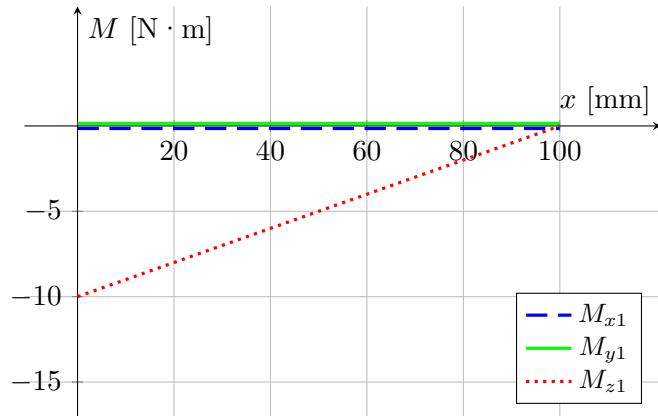


Abbildung 4.16.: Momentverlauf

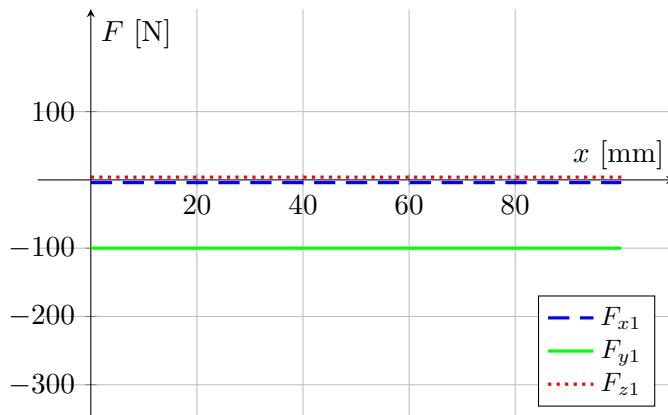


Abbildung 4.17.: Kräfteverlauf

Nachdem die Schnittlasten berechnet und dargestellt wurden, können die kritischen Stellen

untersucht werden.

Im System befindet sich nur eine kritische Stelle, und diese liegt bei $x = 0$, da das Biegemoment M_{z1} dort am höchsten ist.

Die vorhandene Torsionsspannung berechnet sich aus folgende Formel [14].

$$\tau_t = \frac{M_t}{W_t} = \frac{M_x 1}{W_t} \quad (4.13)$$

mit W_t den Widerstandsmomenten für Torsion bei einer Welle mit vollem Querschnitt [14]:

$$W_t = \pi \cdot \frac{d^3}{16} \quad (4.14)$$

Somit ergibt sich folgende Gleichung:

$$\tau_t = \frac{M_t \cdot 16}{\pi \cdot d^3} \quad (4.15)$$

Die vorhandene Biegespannung berechnet sich aus folgende Formel [14]

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} \quad (4.16)$$

mit W_b den Widerstandsmomenten für Biegung bei einer Welle mit vollem Querschnitt [14]:

$$W_b = \pi \cdot \frac{d^3}{32} \quad (4.17)$$

Das gesamte Biegemoment berechnet sich wie folgt:

$$M_b = \sqrt{M_{bz}^2 + M_{by}^2} = \sqrt{M_{z1}^2 + M_{y1}^2} \quad (4.18)$$

Somit ergibt sich folgende Gleichung:

$$\sigma_b = \frac{M_b \cdot 32}{\pi \cdot d^3} \quad (4.19)$$

Die Zug-Druckspannung berechnet sich aus folgende Formel [14]

$$\sigma_{zd} = \frac{N}{A} = \frac{F_{x1}}{A} \quad (4.20)$$

mit A als Querschnittsfläche für volle Wellen:

$$A = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \quad (4.21)$$

Es handelt sich um einen duktilen Werkstoff und deswegen ist die Hypothese der größten Gestaltänderungsenergie (von Mises) in diesem Fall geeignet [14].

$$\sigma_v = \sqrt{(|\sigma_{zd}| + |\sigma_b|)^2 + 3 \cdot \tau_t^2} \quad (4.22)$$

Die Sicherheit statisch belastete Bauteile berechnet sich aus folgende Formel [14]:

$$S = \frac{\sigma_{zul}}{\sigma_v} = \frac{R_e(R_{p0.2})}{\sigma_v} \quad (4.23)$$

Basierend auf den zuvor ermittelten Gleichungen sind die Resultate in Tabelle 4.6 ersichtlich.

Tabelle 4.6.: Ergebnisse der manuellen Berechnung für die kritische Stelle

| Bezeichnung | Formelzeichen | Zahlenwert |
|---------------------------|----------------|------------|
| Biegemoment in z-Richtung | M_{bz1} | -10 Nm |
| Biegemoment in y-Richtung | M_{by1} | 0 Nm |
| Torsionsmoment | M_{t1} | 0 Nm |
| Zug-Druckspannung | σ_{zd1} | 0 N |
| Biegespannung | σ_{b1} | 101,85 MPa |
| Torsionsspannung | τ_{t1} | 0 MPa |
| Vorhandene Spannung | σ_v | 101,85 MPa |
| Sicherheit | S | 2,03 |

Es wird empfohlen, die Mindestsicherheit S_{Fmin} für den statischen Festigkeitsnachweis als Vergleichssicherheit zu verwenden. Die erforderliche Sicherheit gegen Fließen ist $S_{Fmin} = 1,5$. [14]. Dieser Wert konnte für die weiteren Berechnungen benutzt werden.

Die folgende Bedingung muss beim Festigkeitsnachweis eingehalten werden:

$$S_{Fmin} \leq S \quad (4.24)$$

Nachdem die händischen Berechnungen abgeschlossen waren, konnten die Berechnungen mit der Simulationssoftware durchgeführt werden. Zunächst wurde ein 3D-Modell des Stabes erstellt. Anschließend wurden die Kräfte und Einspannungen im System definiert sowie die Materialeigenschaften angepasst. Alle Parameter entsprachen denen der händischen Berechnungen. Im Anschluss wurden die Berechnungen gestartet. Die Simulationsergebnisse für die Von-Mises-Spannung und den Sicherheitsfaktor sind in den Abbildungen 4.18 und 4.19 dargestellt. Diese Ergebnisse umfassen die maximalen und minimalen Werte jeder Simulation. Bei den Abbildungen aus der FEM-Software sind folgende zwei Hinweise zu beachten: Beim Sicherheitsfaktor bedeutet „ul“ einheitslose Werte. Die Daten, die aus den Simulationser-

gebnissen der FEM-Software stammen, sind das Erstellungsdatum des Bildes und nicht das Datum der Simulation. Dies ist im Projektplan zu berücksichtigen.

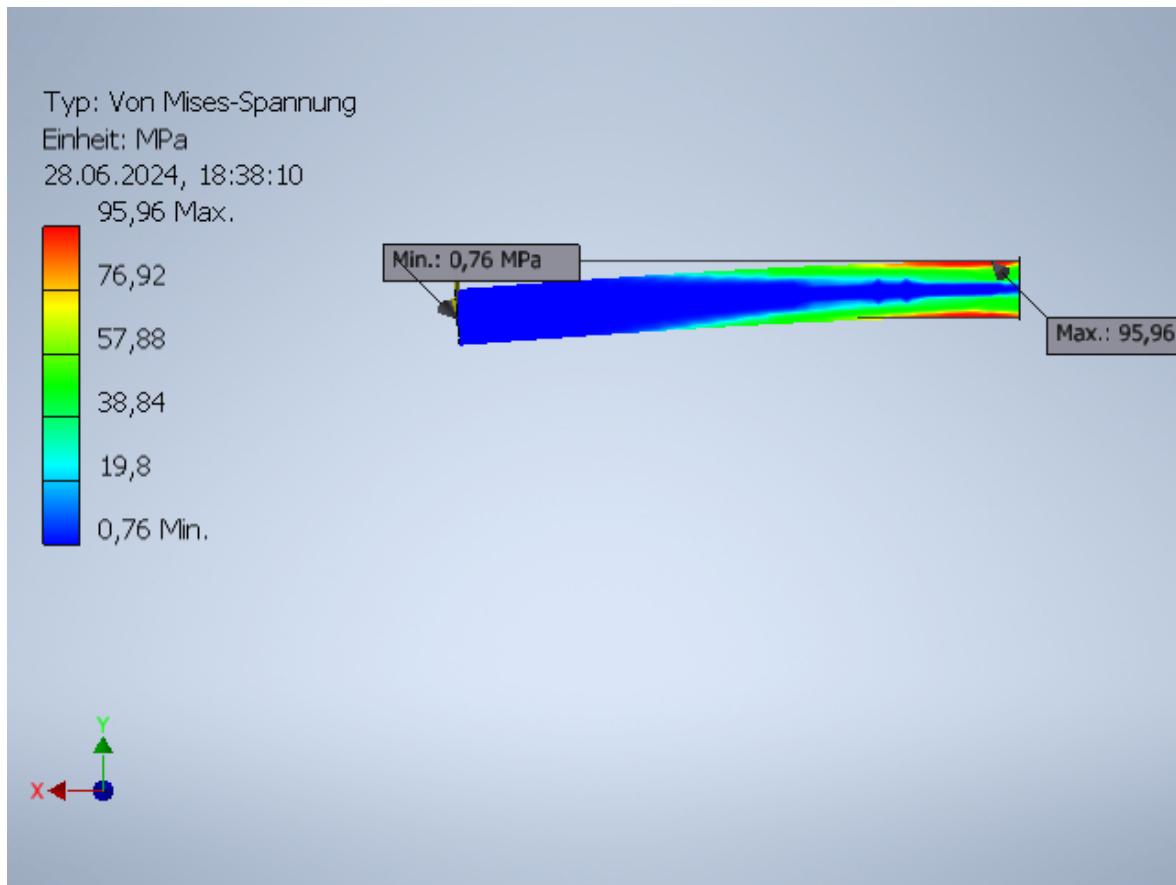


Abbildung 4.18.: Simulationsergebnisse der Von-Mises-Spannung

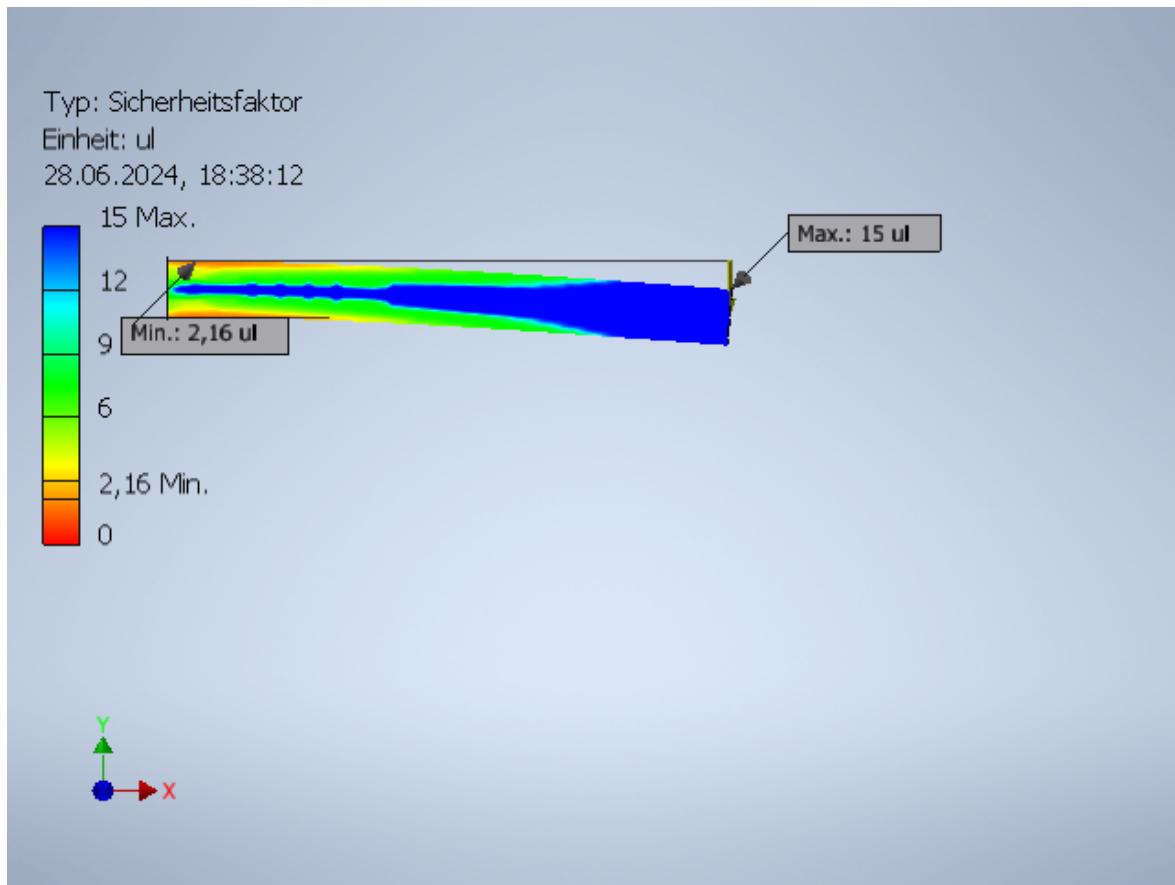


Abbildung 4.19.: Simulationsergebnisse des Sicherheitsfaktors

Die wichtigsten Simulationsergebnisse sind in der Tabelle 4.7 dargestellt.

Tabelle 4.7.: Ergebnisse der Berechnungen des Beispielsystems mit Inventor

| Bezeichnung | Formelzeichen | Zahlenwert |
|------------------------------|---------------|------------|
| Maximale vorhandene Spannung | σ_{v1} | 95,96 MPa |
| Minimale Sicherheit | S_1 | 2,16 |

Die kleinste Sicherheit im Werkstück beträgt $S = 2,16$, was größer ist als die Vergleichssicherheit. Daher ist das Teil als sicher einzustufen.

Die Berechnungen mit der FEM-Software haben ähnliche Ergebnisse wie die händischen Berechnungen geliefert, mit einer Abweichung von ungefähr 6,2%. Daher werden die weiteren Teile mit dieser Methode überprüft und optimiert.

Da die Software die Sicherheitsberechnungen auf Basis der gegebenen Kräfte durchführt, wurden die Kräfte manuell inkrementiert, bis eine Sicherheit nahe der Vergleichssicherheit $S_{Fmin} = 1,5$ erreicht wurde. Auf diese Weise konnten die maximalen Belastungen berechnet

werden, die zu dieser Sicherheit gehören.

Festigkeitsnachweis für die Schweißplatte

Aufgrund der großen Abmessungen und Genauigkeitsprobleme verschlechterte sich die Fertigung der Platte in der Werkstatt. Daher wurde entschieden, sie von spezialisierten Herstellern zu kaufen. Basierend auf dem verfügbaren Arbeitsraum und der Reichweite der Roboter sowie nach Absprache mit den Tutoren über die Abmessungen der zu bearbeitenden Werkstücke, würde die Auswahl zwischen zwei Platten getroffen, die von verschiedenen Herstellern angeboten werden. Der Auswahl standen zwei Platten gegenüber, die den Projektanforderungen entsprachen. Die Eigenschaften der Platten befinden sich in Tabelle 4.8.

Tabelle 4.8.: Vergleich der Plasmaschweißplatten

| | Platte 1 [21] | Platte 2 [22] |
|--------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Hersteller | Demmeler | Siegmund |
| Lochraster | 100x100 D28 | 50x50 D16 |
| Bemaßung | 1500x1000x25 mm ³ | 1500x1000x12 mm ³ |
| Werkstoff | S355 Guss | Stahl S355J2+N + Plasmanitrierung |
| Gewicht | 270 kg | 135 kg |
| Maximale Belastung | - | 1000 kg |
| Preis | 1096€ | 1067€ |

Die zweite Platte wurde ausgewählt, da sie ein kleineres Lochraster aufweist, was die Nutzung des Tisches als Plasmaschneidetisch vereinfacht. Zusätzlich wiegt die Platte deutlich weniger als Platte 1, was zu geringeren Belastungen des Rahmens führt und somit die Bearbeitung schwererer Bauteile ermöglicht. Ein weiterer Vorteil der ersten Platte ist, dass sie plasmanitriert ist und somit gut gegen Rost, Kratzer und Schweißspritzen geschützt ist [23]. Laut dem Hersteller ist die Platte für einen mobilen Hubtisch geeignet und kann Belastungen von bis zu 1000 kg beim Schweißen übernehmen. In diesem Anwendungsfall und bei ähnlichen Montagemöglichkeiten sollten die maximalen Belastungen in einem ähnlichen Bereich liegen. Daher sind in diesem Fall keine zusätzlichen Berechnungen erforderlich.

Festigkeitsnachweis für den Tisch

Um die Festigkeit des Tisches zu überprüfen, werden nur der Rahmen und die Platte berücksichtigt. Die restlichen Teile werden entfernt, um Fehlermöglichkeiten zu vermeiden.

Die Materialeigenschaften werden von den Herstellern vorgegeben und in der entsprechenden Software für die jeweiligen Teile hinterlegt. Der Rahmen besteht aus Aluminiumprofilen und die Platte aus plasmanitriertem Werkzeugstahl. Der Tisch wird mit einer Gesamtkraft von 18 kN belastet, die gleichmäßig auf den Tisch verteilt ist. Die Schwerkraft wurde in der Simulation berücksichtigt.

Die Abbildung 4.20 stellt die Simulationsergebnisse dar. Es ist zu erkennen, dass der Tisch eine minimale Sicherheit von $S = 1.59$ aufweist. Die Simulationsergebnisse sind in Tabelle 4.9 dargestellt.

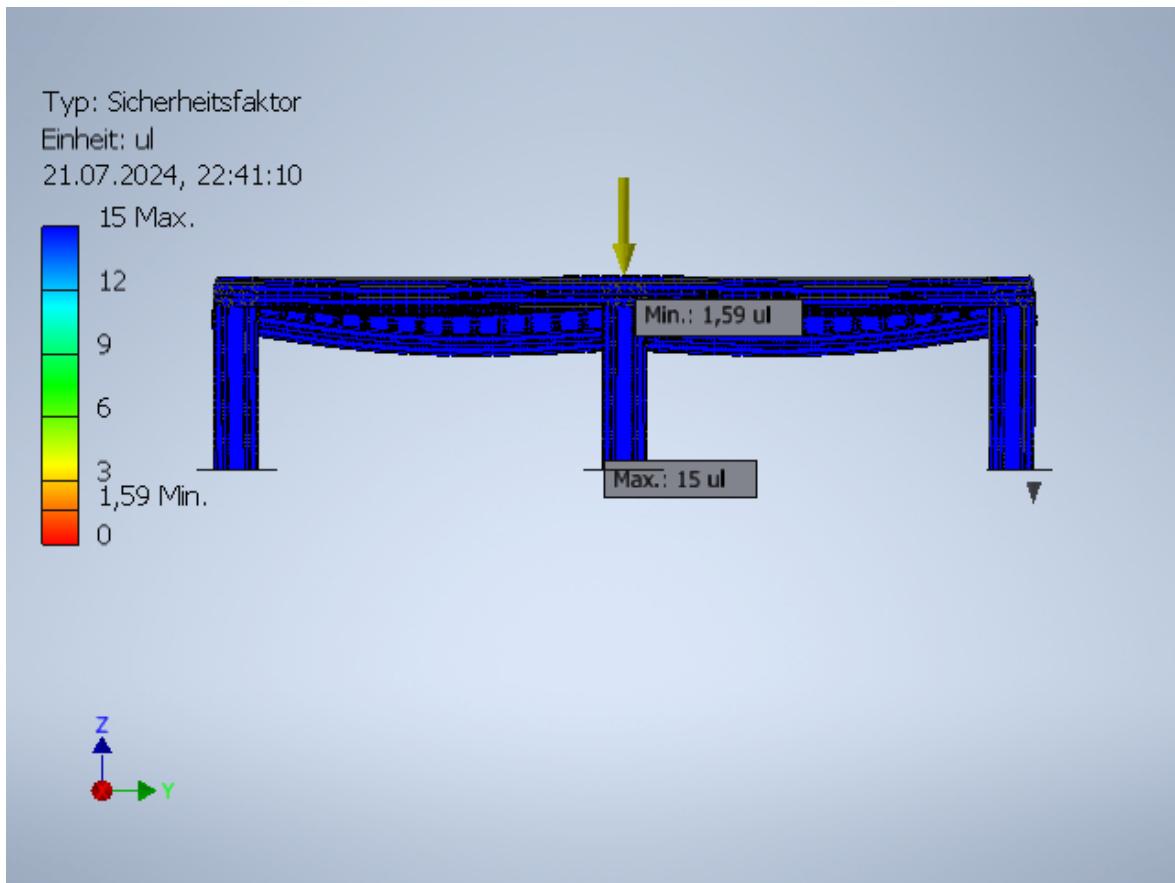


Abbildung 4.20.: Sicherheitsfaktor-Ergebnisse auf dem Tisch

Tabelle 4.9.: Simulationsergebnisse des Tisches

| Bezeichnung | Formelzeichen | Zahlenwert |
|---------------------|---------------|------------|
| Belastung | F | 18 kN |
| Vorhandene Spannung | σ_{v1} | 122,7 MPa |
| Sicherheit | S_1 | 1,59 |

Für die Stabilisierung des Tisches und die Kalibrierung der Höhe werden sechs Tellerstellfüße "D80 M10X80" vom Hersteller Item24 verwendet. Die Stellfüße können laut Herstellerangaben jeweils eine maximale Kraft von $F_{\text{Fuss,max}} = 10 \text{ kN}$ aufnehmen [24].

$$F_{\text{Fuss}} = \frac{F}{n} = \frac{18 \text{ kN}}{6} \approx 3 \text{ kN} \text{ pro Fuß}, \quad (4.25)$$

wobei n die Anzahl der Füße ist.

Dies ergibt $F_{\text{Fuss,max}} > F_{\text{Fuss}}$, und somit sind die Füße geprüft. Die maximale Belastung, die der Tisch aufnehmen kann, beträgt

$$m = \frac{F}{g} = \frac{18 \text{ kN}}{9.81 \text{ m/s}^2} \approx 1834.86 \text{ kg}. \quad (4.26)$$

Basierend auf den Simulationsergebnissen hat der Tisch eine höhere Sicherheit als die erforderliche Sicherheit $S_{\text{Fmin}} = 1,5$, und das bei einer verteilten Belastung von ungefähr 1800 kg bei Raumtemperatur. Obwohl der Rahmen mehr als 1800 kg bei Raumtemperatur tragen kann, beträgt die maximale Belastung der Platte beim Schweißen 1000 kg. Daher ist es empfohlen, diesen Wert nicht zu überschreiten.

Festigkeitsnachweis für den Behälter

Der Abfallbehälter stellt eine der wichtigsten Anforderungen dieses Projekts dar. Daher muss er so ausgelegt sein, dass er genügend Abfall sammeln kann, bevor er vom Benutzer geleert werden muss. Der Behälter wird aus Stahl hergestellt und wird mit zwei Scharniere und zwei Rastbolzen gesichert.

Um die Belastbarkeit des Behälters zu erhöhen, werden Verstärkungsplatten an den Scharnieren und der Rastbolzenbohrung angebracht. Die Verstärkungsplatten sind in Abbildung 4.21 zu sehen. Die Simulationen haben gezeigt, dass durch diese Maßnahme die maximale Belastung erheblich erhöht werden würde. Da solche Platten einfach herzustellen und nicht sehr kostspielig sind, wurde entschieden, sie zu verwenden. Dies wird die Lebensdauer des Behälters erhöhen.

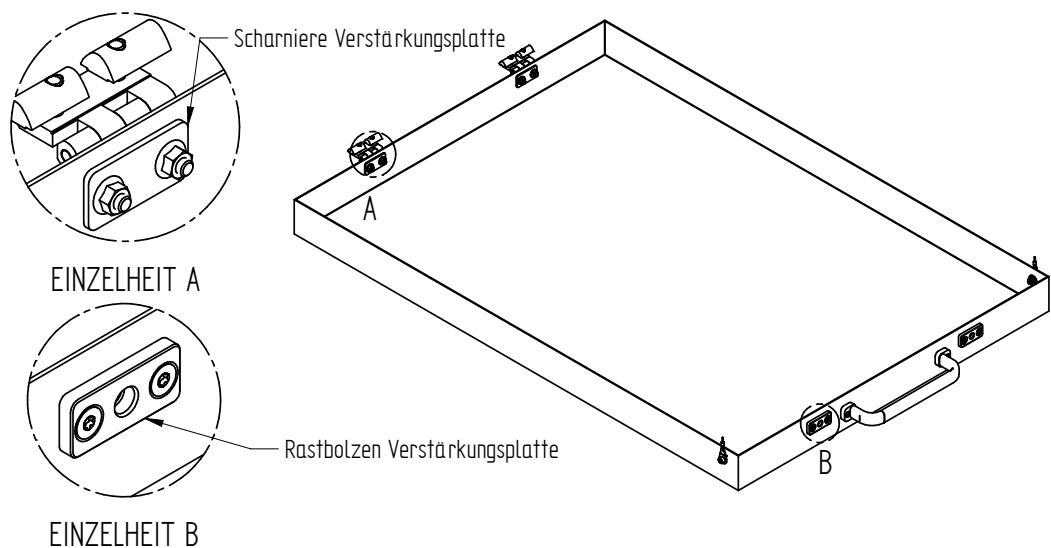


Abbildung 4.21.: Darstellung des Behälters

Die Simulationsergebnisse der FEM werden in Abbildung 4.22 dargestellt:

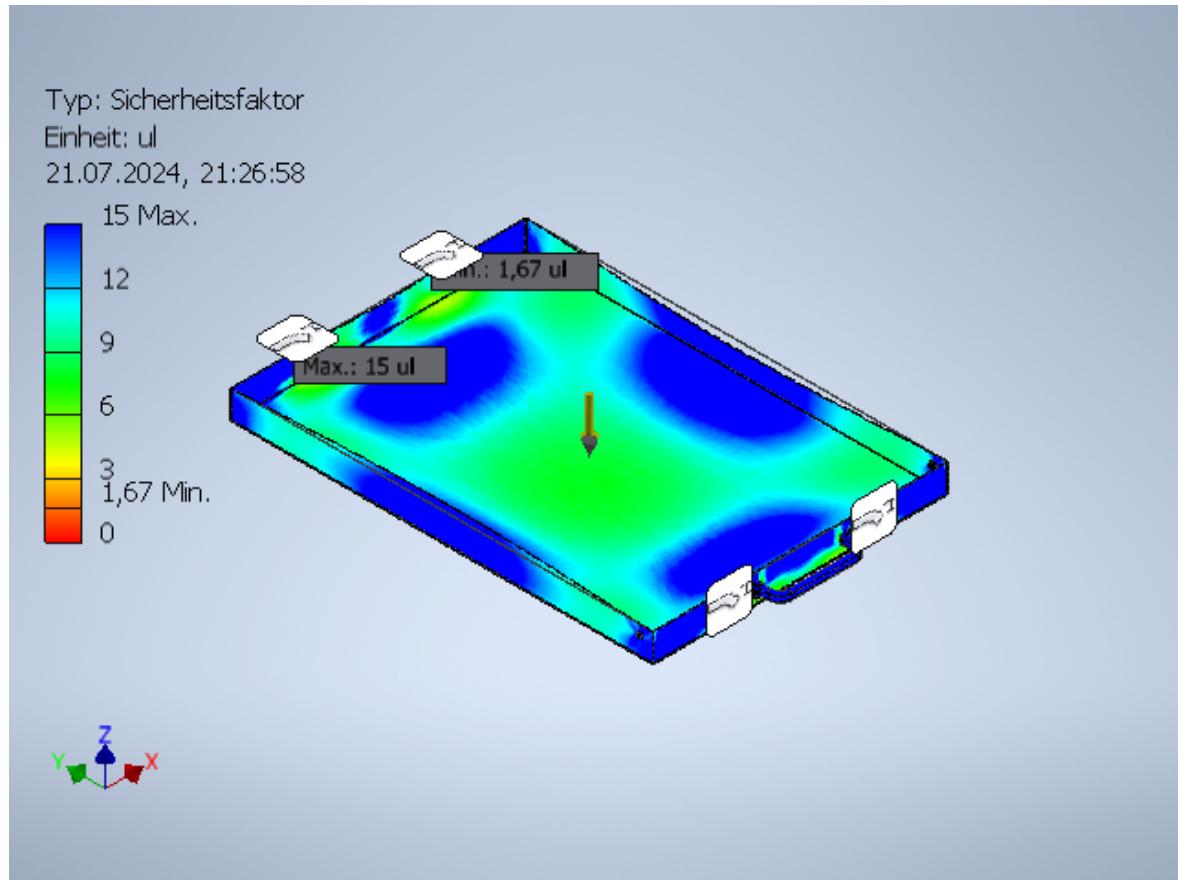


Abbildung 4.22.: Sicherheitsfaktor-Ergebnisse des Behälters

Die wichtigen Ergebnisse der Simulation wurden in Tabelle 4.10 zusammengefasst. Die Schwerkraft wurde bei der Simulation berücksichtigt.

Tabelle 4.10.: Simulationsergebnisse der Behälter

| Bezeichnung | Formelzeichen | Zahlenwert |
|---------------------|---------------|------------|
| Belastung | F | 400 N |
| Vorhandene Spannung | σ_{v1} | 124,2 MPa |
| Sicherheit | S_1 | 1,67 |

Basierend auf den Ergebnissen verfügt der Behälter über die erforderliche Sicherheit. Das maximale Gewicht, die der Behälter tragen kann, berechnet sich durch folgende Formel:

$$m = \frac{F}{g} = \frac{400 \text{ N}}{9.81 \text{ m/s}^2} \approx 40,77 \text{ kg}. \quad (4.27)$$

Daraus ergibt sich, dass der Behälter eine Last von ungefähr 40 kg tragen kann, was für mehrere Anwendungen ausreichend ist.

Die Scharniere mit der Bezeichnung "GN 237-ZD-40-40-A-CR" können jeweils gemäß den Herstellerangaben eine Belastung von $F_{\text{Scharniere,max}} = 2 \text{ kN}$ übertragen [25]. Die Scharniere wurden in der Simulation eingetragen und somit schon geprüft. Die verwendeten Rastbolzen mit der Bezeichnung "GN 417-8-C-NI" können laut Hersteller jeweils eine maximale Belastung von $F_{\text{Bolzen,max}} = 14 \text{ kN}$ übertragen [26]. Die Abbildung 4.23 zeigt den montierten Rastbolzen und die darauf wirkende Kraft.

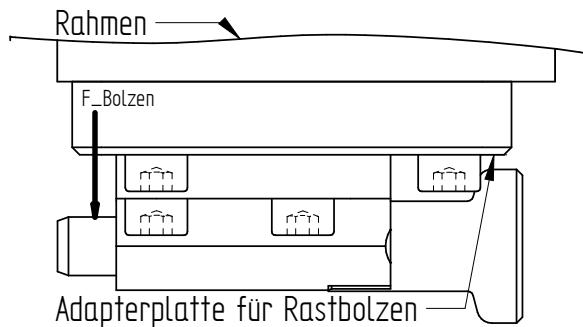


Abbildung 4.23.: Darstellung der Rastbolzen

Basierend auf den Simulationsergebnissen liegt die maximale Kraft, die auf einen Bolzen ausgeübt werden kann, bei $F_{\text{Bolzen}} = 183 \text{ N}$. Diese Kraft ist in der obigen Abbildung dargestellt. Dies ergibt folgende Ergebnisse:

$$F_{\text{Bolzen,max}} > F_{\text{Bolzen}} \quad (4.28)$$

Somit ist der Rastbolzen sicher.

Der Rastbolzen kann nicht direkt am Rahmen befestigt werden. Daher wurde eine Adapterplatte, wie in Abbildung 4.23 gezeigt, verwendet. Diese Platte verfügt über vier Langlöcher, die es ermöglichen, den Abstand der Rastbolzen zum Behälter einzustellen.

Beim Entladen der Abfallbehälter werden die Rastbolzen entsperrt. Der Bediener muss dann den Behälter durch den Handgriff unten schieben, bis er vollständig von den Halteseilen unterstützt wird. Die Abbildung 4.24 zeigt den Tisch mit geöffnetem Behälter.

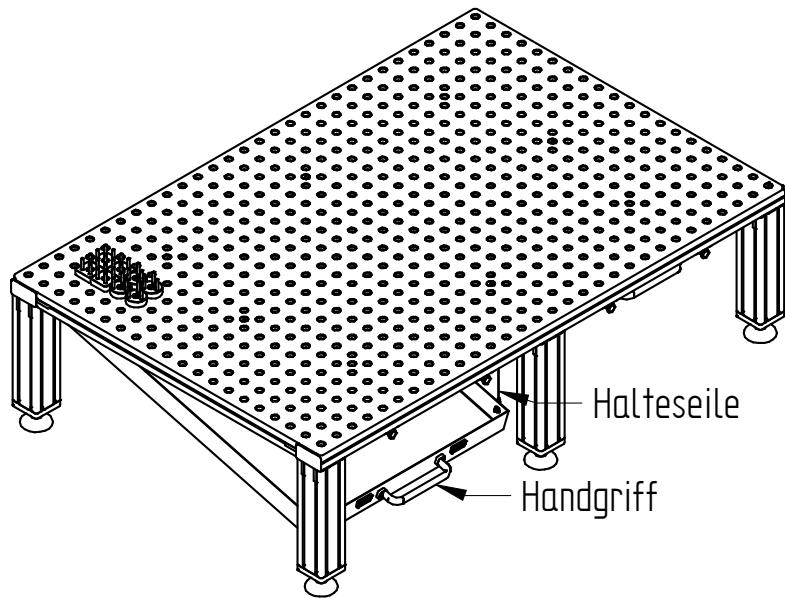


Abbildung 4.24.: Darstellung des Tisches mit offenem Behälter

Daher übernimmt der Handgriff die Belastung der zwei Bolzen mit

$$F_{\text{Griff}} = 2 \cdot F_{\text{Bolzen}} = 366 \text{ N} \quad (4.29)$$

Der benutzte Handgriff mit der Bezeichnung "GN 668-20-190-B-SW" kann laut dem Hersteller in diesem Fall eine maximale Kraft $F_{\text{Griff,max}} = 650 \text{ N}$ aushalten [27]. Somit kann der Handgriff die Belastungen tragen.

Die Halteseile übernehmen dann die Aufgabe des Bedieners und müssen das gesamte Gewicht tragen. Die Halteseile mit der Bezeichnung "GN 111_2-200-C-BL-3" können bis zu einer maximalen Kraft $F_{h,\text{max}} = 1800 \text{ N}$ aushalten und bei jedem Behälter werden zwei davon verwendet [28]. Somit ist $F_{\text{Halteseil}} = F_{\text{Bolzen}}$. Dies ergibt folgende Gleichung:

$$F_{\text{Halteseil}} < F_{h,\text{max}} \quad (4.30)$$

Somit können die Halteseile die Belastung übernehmen.

Festigkeitsnachweis der Plasmuschneidaufnahmen

Die Plasmuschneidaufnahme, im Gegensatz zur Schweißplatte, die von spezialisierten Händlern bezogen wird, ist ein neues und ungetestetes Konzept. Ihre Zuverlässigkeit und Festigkeit müssen daher sorgfältig geprüft werden. Im Plasmuschneidprozess besteht direkter Kontakt zwischen der Plasmuschneidaufnahme und der Plasmastrahl durch das Werkstück. Basierend auf den Erkenntnissen zum Plasmuschneiden aus Kapitel 3.3 und den extrem hohen Temperaturen wird die Überprüfung durch einen Festigkeitsnachweis und die Untersuchung des thermischen Verhaltens der Plasmuschneidaufnahme durch eine Thermografie durchgeführt. Die Thermografie ist eine Methode, die die Temperaturverteilung auf der Oberfläche von Objekten sichtbar macht. Sie funktioniert durch die Erfassung der Infrarotstrahlung, die ein Objekt abgibt. Eine Thermografiekamera wandelt diese unsichtbare Strahlung in elektrische Signale um, die dann in einem farbkodierten Bild dargestellt werden und die Temperaturverteilung anzeigen [29].

Die Strahlungsleistung, die von der Kamera berechnet wird, ergibt sich durch Stefan-Boltzmann-Gesetz:

$$P = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot A \quad (4.31)$$

wobei ϵ der Emissionsgrad, σ die Stefan-Boltzmann'sche Konstante, T die Temperatur und A die Körperfläche ist. Der Emissionsgrad (ϵ) ist hierbei sehr wichtig. Er gibt an, wie viel Strahlung ein realer Körper im Vergleich zu einem idealen schwarzen Körper, mit einem Emissionsgrad von 1 bei gleicher Temperatur abgibt. Verschiedene Materialien haben unterschiedliche Emissionsgrade, was die Genauigkeit der Temperaturmessung beeinflusst. Das Stefan-Boltzmann-Gesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen der abgestrahlten Leistung, der Temperatur und dem Emissionsgrad. Für genaue Temperaturmessungen in der Thermografie ist es notwendig, die Emissionsgrade der zu untersuchenden Materialien zu kennen [30].

Belastungsanalyse der Plasmuschneidaufnahmen

In diesem Abschnitt wird eine Belastungsanalyse der Plasmuschneidaufnahmen durchgeführt. Es wurden eine runde und eine eckige Variante der Plasmuschneidaufnahmen entwickelt, die in den Abbildungen 4.11 bzw. 4.12 dargestellt sind. Die Stifteauflage der Plasmuschneidaufnahmen wird aus Präzisionsstahl „1.1730“ hergestellt. Die Stifte sind aus gehärtetem Stahl gefertigt, und die Mutter ist aus Stahl. Die eckigen Plasmuschneidaufnahmen wurden in der Simulationssoftware mit einer Belastung von 2 kN auf jedem Stift getestet, was eine Gesamtbelastung von 8 kN ergibt. Die Schwerkraft wurde in der Simulation berücksichtigt. Die Abbildung 4.25 stellt die Simulationsergebnisse des Sicherheitsfaktors dar. Die daraus resultierenden Ergebnisse sind in Tabelle 4.11 dargestellt.

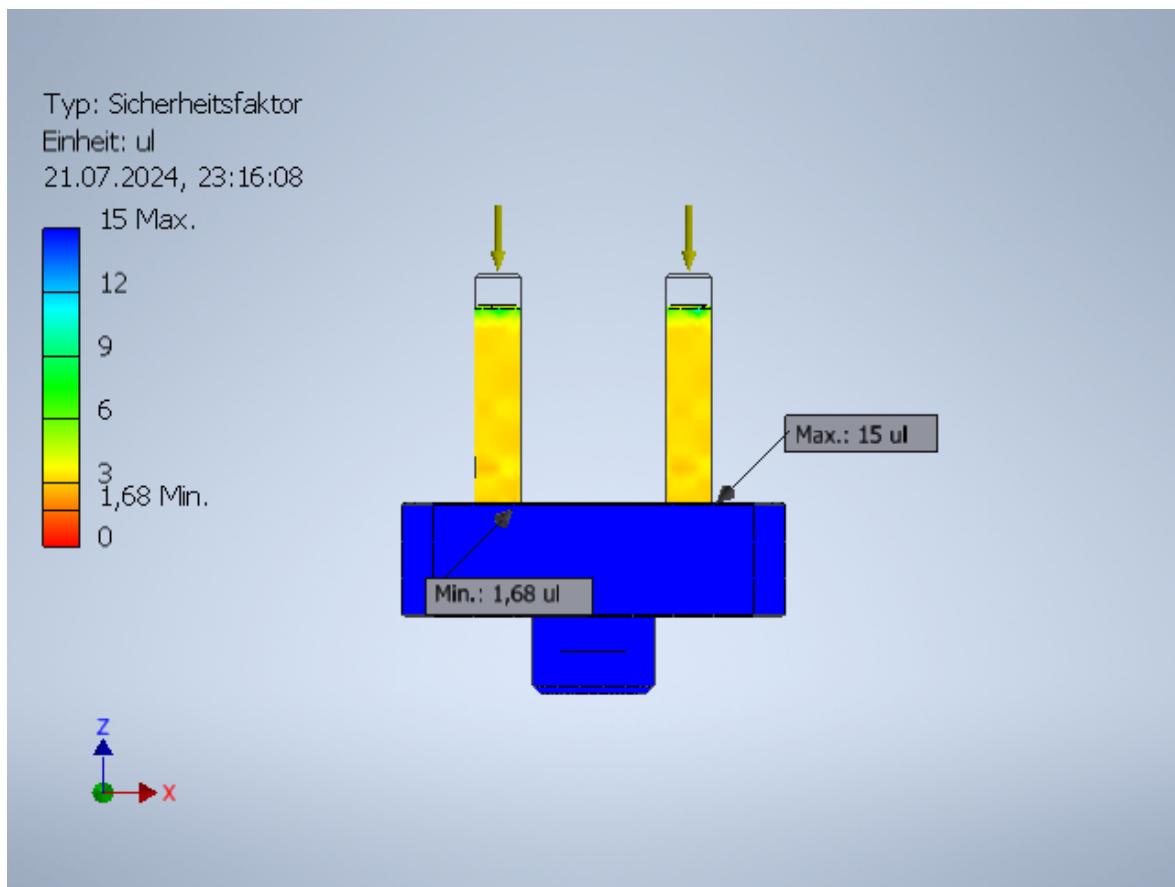


Abbildung 4.25.: Simulationsergebnisse der Plasmaschneidaufnahmen - Sicherheitsfaktor

Tabelle 4.11.: Simulationsergebnisse der Plasmaschneidaufnahmen

| Bezeichnung | Formelzeichen | Zahlenwert |
|---------------------|---------------|---------------------|
| Belastung | F | 8 kN |
| Vorhandene Spannung | σ_{v1} | $123,5 \text{ MPa}$ |
| Sicherheit | S_1 | $1,68$ |

Basierend auf den Simulationsergebnissen ist $S_1 = 1,68 > S = 1,5$, und somit weisen die Plasmaschneidaufnahmen eine ausreichende Sicherheit.

Das maximale Gewicht, das von einer Plasmaschneidaufnahme gehalten werden kann, berechnet sich wie folgt:

$$m = \frac{F}{g} = \frac{8000 \text{ N}}{9.81 \text{ m/s}^2} \approx 815,49 \text{ kg.} \quad (4.32)$$

Unter Einhaltung gleicher Werkstoffe und einer Belastung von 2 kN pro Stift wird eine gesamte Belastung von 6 kN auf die runde Variante der Plasmaschneidaufnahmen ausgeübt.

Die Simulationsergebnisse sind in Tabelle 4.12 zusammengefasst.

Tabelle 4.12.: Simulationsergebnisse der runden Plasmaschneidaufnahmen

| Bezeichnung | Formelzeichen | Zahlenwert |
|---------------------|---------------|---------------------|
| Belastung | F | 6 kN |
| Vorhandene Spannung | σ_{v1} | $110,8 \text{ MPa}$ |
| Sicherheit | S_1 | $1,87$ |

Basierend auf den Simulationsergebnissen ist $S_1 = 1,87 > S = 1,5$, und somit weisen die runden Plasmaschneidaufnahmen auch eine ausreichende Sicherheit.

Das maximale Gewicht, das von einer Plasmaschneidaufnahme gehalten werden kann, berechnet sich wie folgt:

$$m = \frac{F}{g} = \frac{6000 \text{ N}}{9.81 \text{ m/s}^2} \approx 611,6 \text{ kg}. \quad (4.33)$$

Untersuchung des thermischen Verhaltens:

Beim Plasmaschneiden müssen diverse Faktoren und Einstellungen berücksichtigt werden, darunter Stromstärke, Schnittgeschwindigkeiten, Gasart, Abstand zwischen Brenner und Werkstück, verwendetes Material und Materialstärke. Aufgrund der Vielzahl dieser Parameter ist es praktisch unmöglich, alle möglichen Kombinationen zu testen [31].

Die Simulation eines Schneidprozesses zur Untersuchung der Plasmaschneidaufnahmen gestaltete sich aufgrund der Komplexität thermischer Simulationen und der Vielzahl von Faktoren, von denen sie abhängen, als schwierig. Es wurde eine Simulationssoftware gesucht, jedoch war diese kostenpflichtig und es bestand Unsicherheit, ob sie genaue Ergebnisse liefern würde. Deshalb wurde entschieden, Versuche durchzuführen, um herauszufinden, wie die Plasmaschneidaufnahmen reagieren. Dies ist insbesondere wichtig, da die Kerntemperaturen der Plasmastrahl, wie im Kapitel 3.3 erklärt, bis zu 20.000°C erreichen können, während die höchste Schmelztemperatur von Stahl bei 1.500°C liegt. Daher könnten Stifte, die sich im Schneidweg der Plasmastrahl befinden, beschädigt werden. Die Versuche wurden unter Verwendung der optimalen Parameter gemäß den Herstellerangaben der Plasmaschneidmaschine „Powermax45 XP“ durchgeführt und mit einer Thermografiekamera beobachtet, um den schlimmsten Fall zu simulieren. Der Plasmastrahl wurde gezielt über die Stifte geleitet.

Die Versuche hatten zwei Hauptziele:

- Einwirkung des Plasmastrahls auf die Stifte der Plasmaschneidaufnahme
- Untersuchung des Temperaturverlaufs innerhalb der Plasmaschneidaufnahme

die Verwendung optimaler Einstellungen führt dazu, dass ein sauberer Schnitt erzielt wird und Schäden durch der Plasmastrahl auf dem Tisch minimiert werden können.

Es wurden insgesamt zwei Versuche geplant, deren Einstellungen in der Tabelle 4.13 aufgeführt sind.

Tabelle 4.13.: Versuchsbedingungen für die Plamaschneidversuche [32, S. 138]

| Parameter | Versuch 1 | Versuch 2 |
|---|-----------|-----------|
| Gas | Luft | Luft |
| Stromstärke (A) | 45 | 45 |
| Spannung (V) | 129 | 129 |
| Abstand zwischen Brenner und Werkstück (mm) | 1,5 | 1,5 |
| Schnittgeschwindigkeit (mm/min) | 4850 | 2000 |
| Material | Aluminium | Aluminium |
| Materialstärke (mm) | 3,5 | 3,5 |

Für die Versuche wurde geplant, das Werkstück in Abbildung 4.26 zu schneiden.

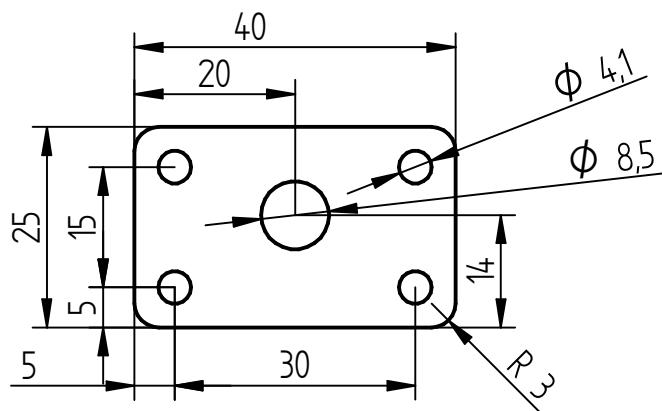


Abbildung 4.26.: Ausgewähltes Werkstück für die Versuche

Die Versuche wurden mit einem Emissionsgrad von 0,52 durchgeführt. Nach den Versuchen wurden zwei Videoaufnahmen erstellt, die die Temperaturverteilung auf der Oberfläche der Plamaschneidaufnahme mittels Thermografie zeigen. Das thermische Verhalten verdeutlicht die Temperaturspitzen und deren Verteilung während des Versuchs. Um die wärmste Stelle bei jedem Versuch zu finden, wurde eigenständig ein Python-Code entwickelt, der die Videos aus der Thermografie analysiert, indem er jedes Frame durchläuft und die Temperaturdaten aus den Pixelintensitäten der Graustufenbilder extrahiert. Jedes Frame wird in ein Graustufenbild konvertiert, wobei die Pixelwerte als Temperaturwerte interpretiert werden. Der Code

berechnet die maximale Temperatur und deren Position in jedem Frame und identifiziert schließlich das Frame mit der höchsten Temperatur. Die genaue Position der heißesten Stelle wird markiert und visualisiert. Die Temperaturwerte werden dabei zwischen 0 °C und 1000 °C normalisiert. Der Code liefert als Ergebnis einen Frame mit der maximalen Temperatur in Graustufen. Zusätzlich wird dieser in die Farbleisten Plasma und Viridis umgewandelt, um die Veranschaulichung der Temperaturverteilung zu verbessern. Der selbstentwickelte Code sowie die Ergebnisse der beiden Versuche befinden sich im Anhang A7.

Beim ersten Versuch lag die wärmste Stelle bei 588 °C, wie in Abbildung 4.27 zu sehen ist. Diese Stelle ist rot markiert. Beim zweiten Versuch lag die wärmste Stelle bei 1000 °C, wie in Abbildung 4.28 zu sehen ist.



Abbildung 4.27.: Darstellung der maximalen Temperatur beim ersten Versuch

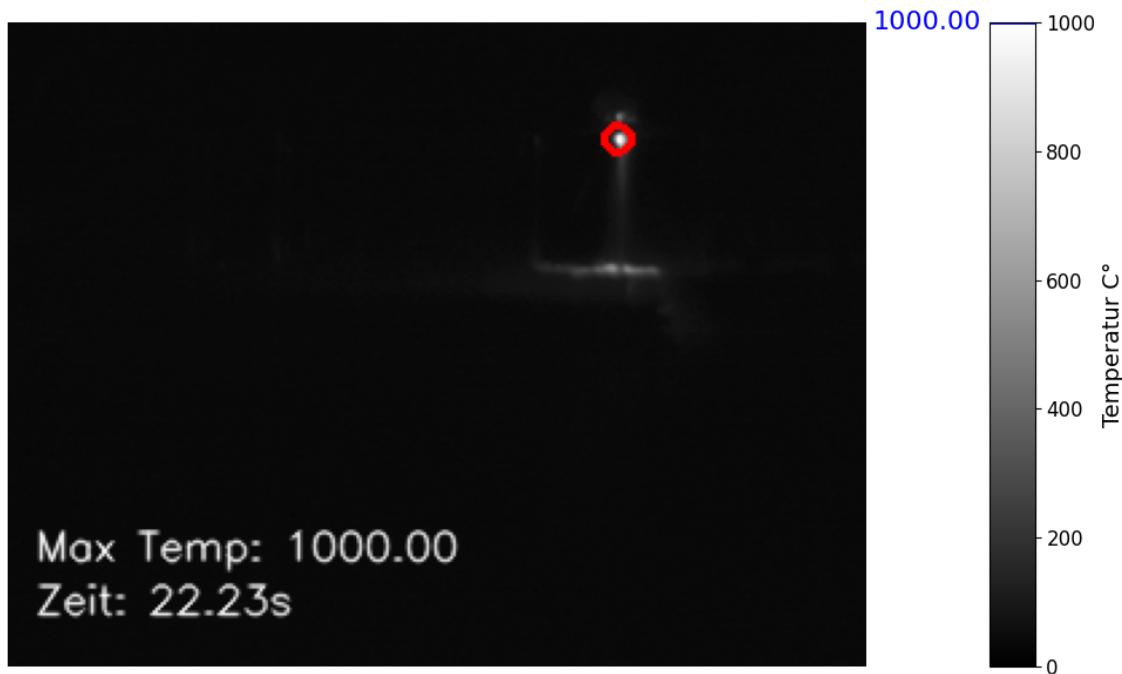


Abbildung 4.28.: Darstellung der maximalen Temperatur beim zweiten Versuch

Obwohl die Herstellereinstellungen im ersten Versuch genau eingehalten wurden, lieferte der Versuch keinen präzisen Schnitt. Dies könnte daran liegen, dass die Düse der Plasmaschneidgerät beschädigt war. Daher wurden im zweiten Versuch andere Einstellungen verwendet, die von der Werkstatt empfohlen wurden. Zusätzlich wurde das Teil vereinfacht, indem nur das Werkstück mit der mittleren Bohrung geschnitten wird. Diese lieferten einen präziseren Schnitt, jedoch müssen noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Das zu schneidende Teil ist sehr klein und kompliziert. Ein präziser Schnitt wäre für größere Schnitte von Vorteil.

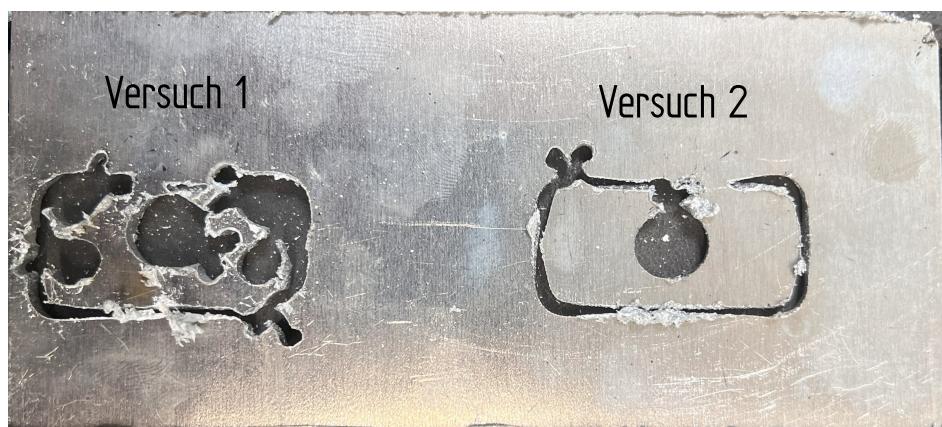


Abbildung 4.29.: Schneidergebnisse beim ersten und zweiten Versuch

Die Abbildungen 4.30 und 4.31 geben einen detaillierten Einblick in den Schaden der Plasmaschneidaufnahme in den beiden Versuchen. Diese Detailansichten sind entscheidend, um die Art und das Ausmaß der Beschädigungen besser zu verstehen. Die Aufnahme weist trotz partieller Beschädigungen noch ausreichende Stabilität und Funktionsfähigkeit auf.

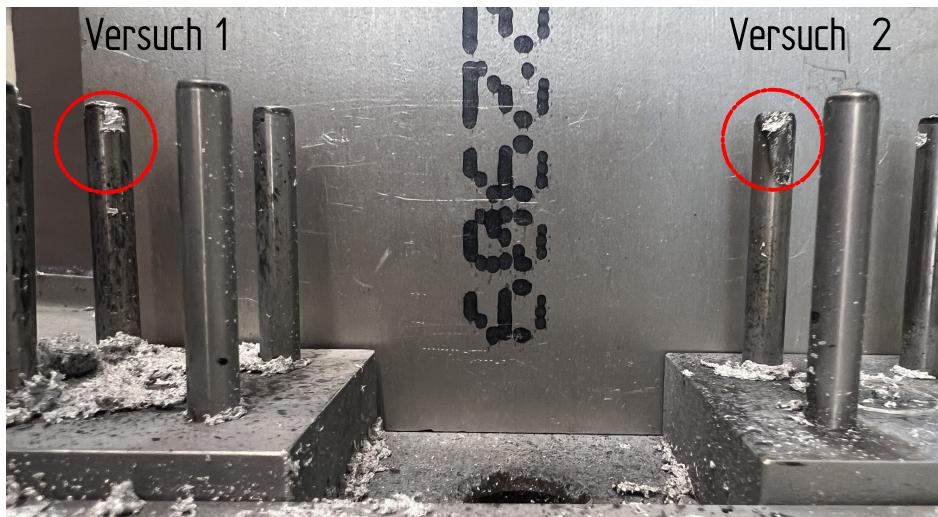


Abbildung 4.30.: Zustand der Plasmaschneidaufnahme nach dem ersten und zweiten Versuch - Vorderansicht



Abbildung 4.31.: Zustand der Plasmaschneidaufnahme nach dem ersten und zweiten Versuch - Oberansicht

Um den Temperaturverlauf auf der Oberfläche der Stifte weiter zu untersuchen, wurde der Python-Code erweitert, um Plots über den Verlauf der maximalen Temperatur bei jeder Frame über die Zeit auf die Schneidaufnahme zu generieren. Diese Plots ermöglichen eine Übersicht über die Spitzentemperaturen beim Schneidprozess sowie den Abkühlungsverlauf danach. Die folgenden Plots sind in der Abbildung 4.32 für den ersten Versuch und der Abbildung 4.33 für den zweiten Versuch dargestellt.

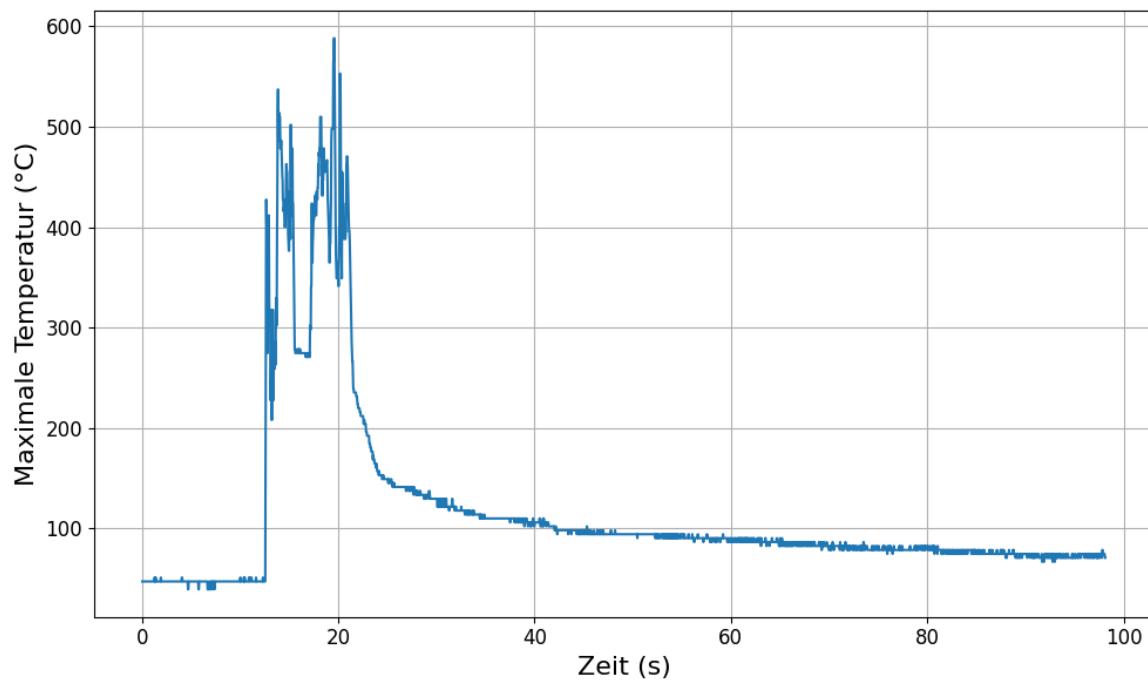


Abbildung 4.32.: Verlauf der maximalen Temperatur bei jeder Frame über die Zeit beim ersten Verusch

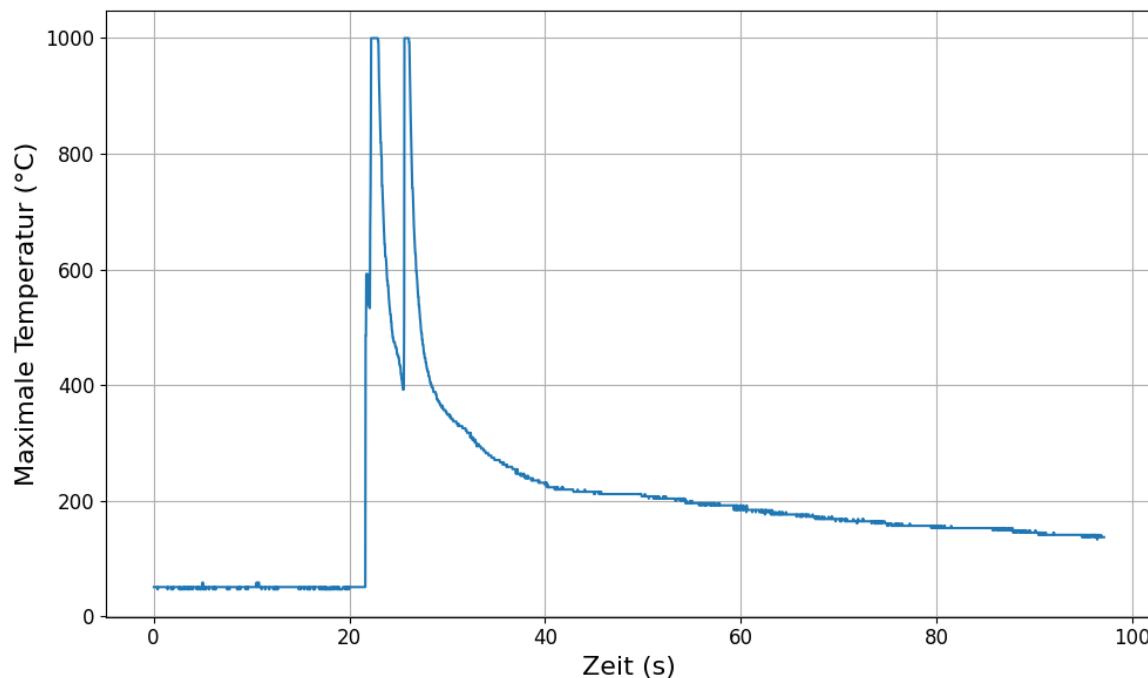


Abbildung 4.33.: Verlauf der maximalen Temperatur bei jeder Frame über die Zeit beim zweiten Verusch

Auswertung der Versuche

Durch diese Versuche wurden wichtige Erkenntnisse gewonnen:

- **Teilschäden an der Plasmaschneidaufnahme:** Obwohl es sich um sehr kritische Fälle handelt, die zur Zerstörung der Stifte führen könnten, wurden diese nur teilweise beschädigt und sind weiterhin für die Benutzung verwendbar. Die restlichen Stifte, die einen Abstand von mindestens 25 mm haben, weisen keine Schäden auf. Dies weist darauf hin, dass das Material der Plasmaschneidaufnahme eine gewisse Widerstandsfähigkeit gegenüber extremen Bedingungen aufweist.
- **Temperaturverteilung innerhalb der Stifte:** Es wurde festgestellt, dass die Temperatur auf der Oberfläche der Stifte nur an bestimmten Stellen stark angestiegen ist. Die restlichen Bereiche der Stifte zeigten sehr geringe Temperaturerhöhungen. Dies ist meistens nur bei direktem Kontakt mit der Plasmastrahl der Fall. Obwohl die Stifte einen Abstand von 25 mm haben, ist die Wärmeübertragung zwischen den Stiften sehr gering bis gar nicht vorhanden. Diese Stifte könnten die Werkstücke im Falle eines Ausfalls eines Stiftes ausreichend halten.
- **Kühlung der Stifte:** Basierend auf dem Temperaturverlauf lässt sich zeigen, dass die Plasmaschneidaufnahme nach dem Erreichen der Spitzenwerte und dem Ende des Schneidprozesses in wenigen Sekunden abkühlt. Die Temperatur der Stifte ist nach dem Schneidprozess in weniger als 20 Sekunden bei beiden Versuchen auf etwa 100°C gesunken.

Basierend auf dem durchgeführten Festigkeitsnachweis und den Experimenten haben die Plasmaschneidaufnahmen sehr gute Ergebnisse geliefert und können als Endkonzept genommen werden, da sie eine bessere und flexiblere Lösung als die alte Plasmaschneidlösung beim alten Tisch darstellen.

4.5.2. Technische Dokumentation

Nach der Überprüfung des Konzepts und der Durchführung der erforderlichen Berechnungen wird in diesem Kapitel eine umfassende technische Dokumentation des Projekts präsentiert. Die Erstellung der technischen Dokumentation des Projekts sowie aller Entwürfe erfolgte mit der 3D-Modellierungssoftware Solid Edge 2023 Student Edition.

Die vollständigen Zeichnungen sind im Anhang enthalten. In diesem Projekt wurden die meisten Komponenten von externen Herstellern bezogen, jedoch wurden einige Teile eigenständig produziert. Für diese selbst hergestellten Teile wurden spezifische Fertigungszeichnungen angefertigt. Die Fertigungszeichnungen umfassen:

- Mutter für die Plasmaschneidaufnahme (Anhang A12)

- Stifteauflage Rund (Anhang A13)
- Stifteauflage Eckig (Anhang A14)
- Rastbolzenplatte (Anhang A15)
- Bolzenführungsplatte (Anhang A16)
- Behälter (Anhang A17)
- Scharniereplatte (Anhang A18)

Zusätzlich zu den Fertigungszeichnungen werden Zusammenbauzeichnungen inklusive Stückliste für die folgenden Komponenten bereitgestellt:

- Plasmabearbeitungstisch (Anhang A8)
- Plamaschneidaufnahme Rund (Anhang A11)
- Plamaschneidaufnahme Eckig (Anhang A10)

Abschließend wurde eine Explosionszeichnung des Tisches (Anhang A9) erstellt.

Zusätzlich wurde eine Montageanleitung für den Plasmabearbeitungstisch erstellt. Eine klare und detaillierte Anleitung vor Beginn der Fertigung jedes Projekts erleichtert die Überprüfung der Montagemöglichkeiten und ermöglicht es, Fehler frühzeitig zu erkennen. So können Schwierigkeiten aufgrund fehlender Fertigungsverfahren, Werkzeuge oder Komplikationen im Voraus überprüft werden. Die Montageanleitung befindet sich im Anhang A5.

Nachdem die technische Dokumentation des Tisches erledigt und geprüft wurde, beginnt die Fertigungsphase des Projekts. Die Montagehinweise zur Fertigung und zum Aufbau der verschiedenen Teile sowie zum Zusammenbauen des Tisches befinden sich im Anhang A6.

5. Ergebnisse und Auswertung

Nach der vollständigen Konstruktion und dem Bau des Tisches wurden folgende Ergebnisse erzielt. Abbildung 5.1 zeigt den gesamten Tisch in seiner Gesamtheit, während Abbildung 5.2 eine Draufsicht der Arbeitsfläche präsentiert. Abbildung 5.3 illustriert den Behälter im gesicherten Zustand.

Die Montage des Tisches verlief reibungslos, und die Justierung der Plasmaschneidaufnahmen konnte mit minimalem Aufwand durchgeführt werden. Die präzise Fertigung der Komponenten ermöglichte eine einfache und schnelle Inbetriebnahme. Die Verwendung hochwertiger Materialien für den Rahmen und die Plasmaschweißplatte hat sich als besonders vorteilhaft erwiesen. Die Materialien bieten nicht nur die notwendige Stabilität, sondern auch eine hohe Beständigkeit gegen Abnutzung und Hitzeeinwirkung, was die Langlebigkeit des Tisches erhöht.

In der praktischen Anwendung zeigte der Tisch hervorragende Leistung. Die Plasmaschneidaufnahmen blieben auch bei intensiver Nutzung stabil und zeigten keine Anzeichen von Verformung und nur geringe Schäden beim extremen Fallen. Die Möglichkeit, die Aufnahmen präzise und wiederholbar zu positionieren, trug zu einer hohen Qualität der bearbeiteten Werkstücke bei.

Die Konstruktion des Tisches berücksichtigt wichtige Sicherheitsaspekte. Die stabile Bauweise und die Verankerung am Boden minimieren die Gefahr von Unfällen durch Verschieben des Tisches während des Betriebs. Zudem sorgt das benutzerfreundliche Design dafür, dass die Bedienung ohne großen Aufwand vorgenommen werden kann. Die Verwendung von Abdeckklappen und die Anwendung von abgerundeten Kanten spielen eine große Rolle beim Schutz der Anwender. Das Rastbolzensystem ermöglicht es ergonomisch, das Leeren von Abfall zu erleichtern.

Der Tisch lässt viel Raum für Modularität und bietet die Möglichkeit, zusätzlich zum Plasmaschneiden und Schweißen die Integration verschiedener Fertigungsverfahren mit Robotern zu ermöglichen. Der Tisch erlaubt auch die Verbindung mit alten Plasmaschneid- und Schweißmodulen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die finale Konstruktion des Plasma-Bearbeitungstisches alle gestellten Anforderungen erfüllt und in mehreren Bereichen sogar übertroffen hat. Der Tisch bietet eine solide, stabile und flexible Arbeitsplattform.



Abbildung 5.1.: Fertiggestellter Bearbeitungstisch

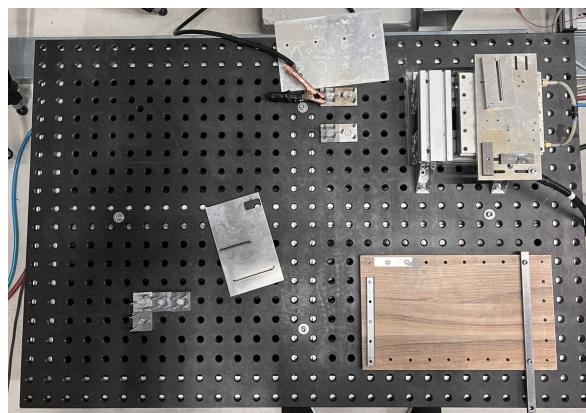


Abbildung 5.2.: Anwendungsmöglichkeiten der Bearbeitungstisches

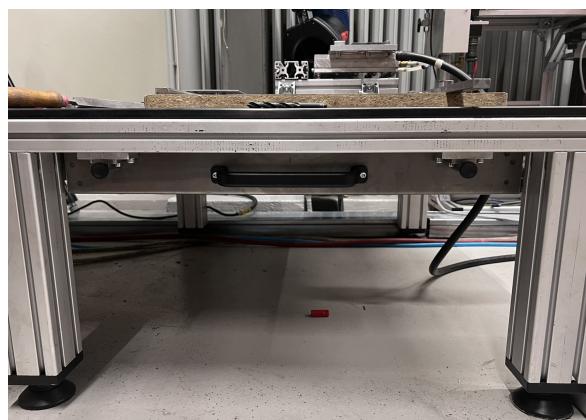


Abbildung 5.3.: Behälter im gesperrten Zustand

6. Fazit und Ausblick

Das Hauptziel dieser Arbeit bestand im Aufbau eines Plasma-Bearbeitungstisches für eine Roboter-Vorrichtung im Fachgebiet der Beschichtungstechnik. Das Projekt wurde gemäß den Richtlinien der VDI 2221 durchgeführt, wobei ein strukturierter und methodischer Ansatz verfolgt wurde.

Zunächst wurde eine umfassende Recherche zum aktuellen Stand der Technik durchgeführt, um eine solide Grundlage für die Entwicklung zu schaffen. Darauf basierend wurde eine detaillierte Anforderungsliste erstellt. Um die Hauptfunktionen des Bearbeitungstisches zu analysieren, wurden Blackbox-Darstellungen und eine Funktionsstruktur entwickelt. Diese dienten als Vorbereitung für die Anwendung der morphologischen Kastenmethode, mit der verschiedene Lösungsmöglichkeiten erarbeitet wurden.

Aus den erarbeiteten Lösungen wurden drei Konzepte ausgewählt und anhand festgelegter Kriterien untersucht und bewertet. Nach der Auswahl des geeigneten Konzepts wurde ein detailliertes Modell mithilfe der Modellierungssoftware Solid Edge erstellt. Dieses Modell wurde durch Berechnungen und Anpassungen mittels der FEM-Simulationssoftware Autodesk Inventor Professional weiter optimiert, um den definierten Anforderungen gerecht zu werden. Im praktischen Teil des Projekts wurden die theoretischen Daten an die Werkstatt übergeben, wo die Teile bestellt wurden. Nach der Lieferung der Teile wurde der Tisch konstruiert. Nachdem der Tisch gebaut wurde, wurde ein Experiment durchgeführt, um das thermische Verhalten der selbstentwickelten Plasmaschneidaufnahme zu testen. Das Ergebnis der Arbeit war ein stabiler Bearbeitungstisch, der die Anforderungen vollständig erfüllt. Darüber hinaus bietet der Tisch eine hohe Modularität und lässt Raum für verschiedene Verbesserungsmöglichkeiten.

Die erfolgreiche Umsetzung dieses Projekts eröffnet zahlreiche Perspektiven für zukünftige Entwicklungen. Folgende Punkte sind von besonderem Interesse:

- Optimierung der Werkstückpositionierung: Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse aus den Versuchen sollten zukünftige Arbeiten darauf abzielen, die Positionierung der Werkstücke auf dem Tisch zu optimieren. Durch präzise Ausrichtung könnte verhindert werden, dass der Schneidweg auf die Stifte der Schneidaufnahmen trifft. Dies würde die Lebensdauer der Schneidaufnahmen verlängern und ihre Zuverlässigkeit signifikant erhöhen.
- Automatische Kalibrierung der Roboter: Implementierung eines Systems zur automatischen Kalibrierung der Roboter, um sicherzustellen, dass sie stets präzise und effizient arbeiten. Dieses System könnte regelmäßige Selbsttests und Anpassungen vornehmen, um Abweichungen in der Positionierung und Bewegung der Roboter zu erkennen und zu

korrigieren, was die Gesamtgenauigkeit und Zuverlässigkeit der Bearbeitungsprozesse weiter verbessert.

- Synchronisation und Koordination der Roboter: Die Entwicklung eines Steuerungssystems, das die gleichzeitige und koordinierte Bewegung beider Roboter ermöglicht, um komplexe Bearbeitungsaufgaben effizient zu bewältigen.
- Erweiterung der modularen Einheiten: Der Tisch könnte um zusätzliche Module erweitert werden, wie die Entwicklung neuer Haltevorrichtungen.
- Automatisierte Qualitätskontrolle: Dank seiner Modularität und Präzision ermöglicht der Tisch die Integration von Sensoren und Kamerasystemen, die eine kontinuierliche Überwachung und Qualitätskontrolle der Bearbeitungsvorgänge gewährleisten. Diese Systeme können beispielsweise die Genauigkeit und Konsistenz der Plasmaschnitte überwachen, indem sie die Bewegungen der Roboter verfolgen. Durch den Einsatz von KI-gestützten Algorithmen können Abweichungen in Echtzeit erkannt und analysiert werden, was eine sofortige Anpassung und Vermeidung von Fehlern ermöglicht.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der entwickelte Plasma-Bearbeitungstisch nicht nur die aktuellen Anforderungen erfüllt, sondern auch eine vielversprechende Basis für weitere Optimierungen und Anwendungen darstellt.

Literatur

- [1] A. H. Fritz u. a., Hrsg. *Fertigungstechnik*. 8., neu bearbeitete Auflage. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, S. 178, 350, 136, 367. ISBN: 978-3-540-76696-4.
- [2] U. Dilthey. *Schweitechnische Fertigungsverfahren 1: Schwei- und Schneidtechnologien*. 3., bearbeitete Auflage. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006, S. 52, 53, 56, 58, 237, 238. ISBN: 3-540-33154-9.
- [3] Aggregatzustand. URL: https://www.all-electronics.de/files/upload/post/all/wp-content/uploads/migrated/image/artikel/158352_3.jpg.
- [4] P. A. TIPLER. *PHYSICS FOR SCIENTISTS AND ENGINEERS: Fr studierende der naturwissenschaften und technik... - includes digital download*. [S.l.]: SPRINGER, 2024, S. 679, 1169. ISBN: 978-3-662-67936-4.
- [5] J. K. Felixberger. *Chemie für Einsteiger*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, Imprint und Springer Spektrum, 2017, S. 38. ISBN: 978-3-662-52821-1.
- [6] U. Stroth. *Plasmaphysik: Phänomene, Grundlagen und Anwendungen*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018, S. 5. ISBN: 978-3-662-55236-0.
- [7] H. J. Fahrenwaldt u. a. *Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Prozesse, Fertigung ; mit ... 162 Tabellen*. 4., überarb. Aufl. Praxis. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011, S. 72, 74, 185. ISBN: 978-3-8348-8199-1.
- [8] A. H. Fritz u. a., Hrsg. *Fertigungstechnik*. 13th ed. 2022. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg und Springer Vieweg, 2022, S. 360, 361, 362, 437, 440. ISBN: 978-3-662-64875-9.
- [9] *Künstliche Intelligenz im Bauwesen*. Springer Nature, 2024, S. 397. ISBN: 978-3-658-42796-2.
- [10] B. Fleischer u. a. *Entwickeln Konstruieren Berechnen: Komplexe praxisnahe Beispiele mit Lösungsvarianten*. 2., verbesserte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009, S. 1, 2, 3, 142. ISBN: 978-3-8348-9611-7.
- [11] *VDI 2221 Blatt 1, Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung: = Design of technical products and systems - model of product design*. Ausg. deutsch/englisch. VDI-Richtlinien. Berlin: Beuth Verlag GmbH, November 2019.
- [12] *Interaktionen mit großen Datenmengen und unscharfen Analyseergebnissen*. Bd. 2222. VDI-Berichte. Düsseldorf: VDI-Verl., 2014. ISBN: 9783180922225.

- [13] B. Bender u. a., Hrsg. *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 9. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2021, S. 259, 261, 263, 300. ISBN: 978-3-662-57302-0.
- [14] H. Wittel u. a. *Roloff/Matek Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung*. 24., überarb. u. akt. Auflage 2019. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, S. 12, 13, 14, 43, 45, 46, 47, 69, 70, 177, 1173. ISBN: 9783658262808. DOI: 10.1007/978-3-658-26280-8.
- [15] Demmeler. URL: <https://www.demmeler.com/de/produkte%20shop/3d-schweisstisch-und-spannsysteme/3d-schweisstische>.
- [16] Siegmund. URL: <https://www.siegmund.com/fr/Produits/Table-elevatrice-mobile,6005.php>.
- [17] Messercutting. URL: <https://de.messercutting.com/produkte/maschinen/komponenten/schneidtische/wassertisch>.
- [18] Beutingsystems. URL: <https://beutingsystems.de/produktwelt/systeme/wasserschneidtisch/>.
- [19] Hezinger. URL: <https://www.hezinger.de/formschneiden/plasmashneidmaschine>.
- [20] IRB. URL: https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=PR10035EN_R8&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch.
- [21] Demmeler. URL: <https://www.demmeler.com/de/produkte-shop/original-3d-spannsysteme/3d-schweisstische>.
- [22] Siegmunds. URL: <https://www.siegmund.com/de-ch/113-Lochplatten/237-Lochplatten-fur-Workstation/Ubersicht,102.php>.
- [23] Siegmunds. URL: <https://www.siegmund.com/de/Produkte/Lochplatten,6697.php>.
- [24] Item24. URL: <https://www.item24.com/en-de/knuckle-foot-d20-m5x45-black-46475?category=profile-technology>.
- [25] Ganternorm. URL: <https://www.ganternorm.com/en/products/3.3-Hinging-latching-locking-of-doors-and-covers/Hinges/GN-237-Hinges-Zinc-die-casting-Aluminum>.
- [26] Ganternorm. URL: <https://www.ganternorm.com/de/produkte/schnell-suche/GN-417-Rastbolzen-mit-Rastsperre?q=417>.
- [27] Ganternorm. URL: <https://www.ganternorm.com/de/produkte/1.2-Bedienen-mit-Maschinen-und-Geraetegriffen/Buegelgriffe/GN-668-Flache-Buegelgriffe-Aluminium>.
- [28] Ganternorm. URL: <https://www.ganternorm.com/en/products/3.2-Mounting-positioning-levelling-with-screws-clamping-and-supporting-elements/Retaining-cables/GN-111.2-Retaining-Cables-Stainless-Steel-with-Key-Rings-or-One-Key-Ring-and-One-Mounting-Tab>.

- [29] J. Bauch u. a. *Physikalische Werkstoffdiagnostik: Ein Kompendium wichtiger Analytikmethoden für Ingenieure und Physiker*. 1. Auflage 2017. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, S. 22. ISBN: 978-3-662-53952-1.
- [30] J. Eichler u. a. *Physik für das Ingenieurstudium: Prägnant mit vielen Lernkontrollfragen und Beispielaufgaben*. 7. Auflage. Weisbaden, Germany: Springer Vieweg, 2023, S. 128. ISBN: 978-3-658-38834-8.
- [31] Hypertherm. URL: https://stvcnc.com/wp-content/uploads/2021/02/Powermax45XP_Manual_R.pdf.
- [32] gfd-katalog. URL: https://www.gfd-katalog.com/master/media/MKK/media/26/262910_ANLEITUNG-2019-03.PDF.

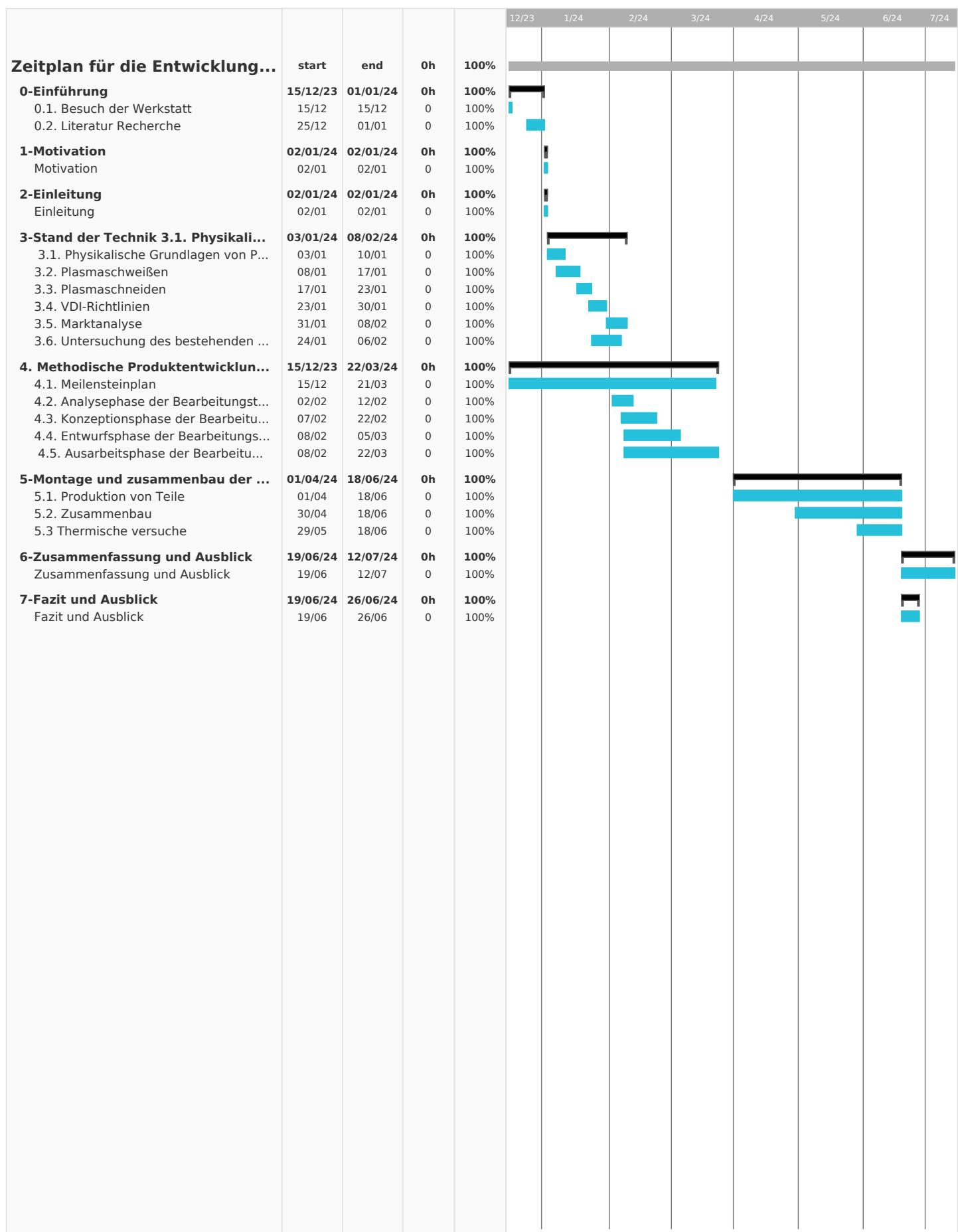
A. Anhang

- A1. Anforderungsliste
- A2. Unsortierte morphologische Kasten
- A3. Morphologische Kasten mit 6 Konzepte
- A4. Projektplan
- A5. Montage Anleitung
- A6. Montage Hinweise
- A7. Python Code für die Visualisierung der maximalen Temperatur
- A8. Zusammenbauzeichnung Plasmabearbeitungstisches
- A9. Explosionszeichnung
- A10. Zusammenbauzeichnung Plasmaschneidaufnahme (eckig)
- A11. Zusammenbauzeichnung Plasmaschneidaufnahme (rund)
- A12. Fertigungszeichnungen der Plasmaschneidaufnahme Mutter
- A13. Fertigungszeichnungen der Stifteauflage (rund)
- A14. Fertigungszeichnungen der Stifteauflage (eckig)
- A15. Fertigungszeichnungen der Rastbolzenplatte
- A16. Fertigungszeichnungen der Bolzenführungsplatte
- A17. Fertigungszeichnungen der Behälter
- A18. Fertigungszeichnungen der Scharniereplatte
- A19. Weitere Hinweise

| Technische Universität Berlin Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme | | | Anforderungsliste für einen Bearbeitungstisch für zwei robotergestützte Plasma- Bearbeitungsverfahren | Fachgebiet Beschichtungstechnik | |
|--|------------------------------|----------------|--|------------------------------------|-----------------------------|
| Nº | Prio | Änderungsdatum | Anforderungen | Verantwortlich | Bemerkungen / Begründung |
| Physikalisch-Technische Funktion | | | | | |
| 1 | F | 05.12.2023 | Stückzahl: 1 | Yassine | Aufgabenstellung |
| 2 | F | 02.01.2024 | Maximale Breite: 1000 mm | Yassine | Bemaßungen |
| 3 | F | 02.01.2024 | Maximale lange: 2500 mm | Yassine | Bemaßungen |
| 4 | F | 02.01.2024 | Maximale Höhe: 60 mm | Yassine | Bemaßungen |
| 5 | F | 02.01.2024 | Schweißplatte dicke mindestens 10 mm | Yassine | - |
| 6 | F | 05.12.2023 | Übernahme große Temperaturen | Yassine | - |
| 7 | F | 05.12.2023 | Umsetzung der Anforderungen für Plasmaschweißen | Yassine | Aufgabenstellung |
| 8 | F | 05.12.2023 | Umsetzung der Anforderungen für Plasmuschneiden | Yassine | Aufgabenstellung |
| 9 | F | 05.12.2023 | Präzise Fertigung | Yassine | Aufgabenstellung |
| 10 | F | 02.01.2024 | Niveau Korrektur Möglichkeiten | Yassine | - |
| 11 | F | 05.12.2023 | Minimale Tragfähigkeit: 200 kg | Yassine | - |
| 12 | F | 05.12.2023 | Kalibrierung von Werkzeugen | Yassine | - |
| 13 | W | 05.12.2023 | Modulare Konstruktion | Yassine | Aufgabenstellung |
| 14 | W | 05.12.2023 | Absauge Systeme mit dem Tisch verbinden | Yassine | - |
| 15 | W | 05.12.2023 | Abkühlung des Tisches | Yassine | - |
| Technologie | | | | | |
| 16 | F | 05.12.2023 | Verwendung von Normen | Yassine | - |
| 17 | F | 05.12.2023 | Methodische Produktentwicklung | Yassine | Aufgabenstellung |
| Wirtschaftlichkeit | | | | | |
| 18 | F | 05.12.2023 | Benutzung von Normteilen | Yassine | - |
| 19 | F | 05.12.2023 | Geringe Herstellungskosten | Yassine | - |
| 20 | W | 05.12.2023 | Nutzung vorhandene Ressourcen | Yassine | Aufgabenstellung |
| 21 | W | 05.12.2023 | Wartung mit vorhandenen Ressourcen | Yassine | Aufgabenstellung |
| 22 | W | 05.12.2023 | Herstellung in der Universitätswerkstatt | Yassine | Aufgabenstellung |
| Mensch-Produkt-Beziehung | | | | | |
| 23 | F | 05.12.2023 | Sicherheit | Yassine | - |
| 24 | F | 05.12.2023 | Einfache Wartung | Yassine | - |
| 25 | F | 05.12.2023 | Ergonomie | Yassine | - |
| F = Forderung - W = Wunsch - Prio = Priorität | | | | | |
| Datum: 18.06.2024 | Erstellt von: Yassine Kraiem | | | Version: | v1 |

| | Konzepte | | | | |
|-------------------|---|-------------------|--------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| Funktionen | Teilfunktionen | Teillösungen | | | |
| 1- Rahmen | Material form | Aluminiumprofile | Profilstahlrohr | Profilstahlrohr mit Lochraster | - |
| | Verbindungselement | Geschweißt | Verschraubt | Formschlüssige Verbindungen | Genietet |
| | Bodenelemente | Verstellbare Höhe | Im Boden verschraubt | Roller | - |
| 2- Schweißbereich | Schweißtisch Platte | Lochraster Platte | 3D Platte mit Lochraster | T-Profil platte | - |
| | Verbindungselement | Geschweißt | Verschraubt | Formschlüssige Verbindungen | Genietet |
| 3- Schneidbereich | Werkstuckaufname-element | Gerade Lamellen | Verzähnte Lamellen | Gebogene Lamellen | Punktuelle kontakt |
| | Verbindung der Werkstuckaufname element | Geschweißt | Verschraubt | Formschlüssige Verbindungen | Genietet |
| 4- Abfall Bereich | Fertigung | Gebogen | Tiefgezogen | Gebogen und geschweißt | geschweißt |
| | Form | Trapezförmig | Rechteckig | Asymmetrisch | Abgerundeter rechteckig |
| | Öffnung Möglichkeiten | Linearführungen | Scharniere | Hydraulikzylinder | - |
| | Sperrmechanismus | Steckbolzen | Rastbolzen | Klemmhebel | - |
| | Griff | Bügelgriffe | Klappgriffe | Griffschalen | - |
| | Sicherung | Kette | Halteseil | Hydraulikzylinder | - |

| | | Konzepte | | | | | |
|-------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Funktionen | Teilfunktionen | Lösung 1 | Lösung 2 | Lösung 3 | Lösung 4 | Lösung 5 | Lösung 6 |
| 1- Rahmen | Material form | Aluminiumprofile | Profilstahlrohr | Aluminiumprofile | Profilstahlrohr | Profilstahlrohr mit Lochraster | Profilstahlrohr mit Lochraster |
| | Verbindungselement | Verschraubt | Geschweißt | Verschraubt | Verschraubt | Verschraubt | Verschraubt |
| | Bodenelemente | Verstellbare höhe | Verstellbare höhe |
| 2- Schweißbereich | Schweißtisch Platte | Lochraster Platte | Lochraster Platte | Lochraster Platte | T-Profil platte | 3D Platte mit Lochraster | T-Profil platte |
| | Verbindungselement | Verschraubt | Verschraubt | Verschraubt | Verschraubt | Verschraubt | Verschraubt |
| 3- Schneidbereich | Werkstuckaufname-element | Verzähnte Lamellen | Gerade Lamellen | Punktuelle kontakt | Verzähnte Lamellen | Punktuelle kontakt | Gebogene Lamellen |
| | Verbindung | Formschlüssige Verbindungen | Formschlüssige Verbindungen |
| 4- Abfall Bereich | Fertigung | Geschweißt | Gebogen und geschweißt | Gebogen und geschweißt | Gebogen und geschweißt | Gebogen und geschweißt | Gebogen und geschweißt |
| | Form | Trapezförmig | Rechteckig | Rechteckig | Trapezförmig | Rechteckig | Rechteckig |
| | Öffnung Möglichkeiten | Scharniere | Scharniere | Scharniere | Scharniere | Hydraulikzylinder | Linearführungen |
| | Sperrmechanismus | Rastbolzen | Steckbolzen | Rastbolzen | Rastbolzen | Klemmhebel | Klemmhebel |
| | Griff | Bügelgriffe | Bügelgriffe | Bügelgriffe | Klappgriffe | Klappgriffe | Griffschalen |
| | Sicherung | Halteseil | Kette | Halteseil | Kette | - | - |



A5. Montage Anleitung

Die Montage des Bearbeitungstisches unterteilt sich in zwei Hauptteile:

1. Montage der Plasmaschneidaufnahmen:

Die Montage der Plasmaschneidaufnahmen für beide Varianten erfolgt nach dem gleichen Prinzip. Dabei orientieren sich die Nummerierungen an der Zusammenbauzeichnung der Plasmaschneidaufnahmen im Anhang A10 und A11. Zuerst müssen die Stifte (3) auf die Stiftauflage (2) gepresst werden. Dann kann die Mutter (2) mit der Schraube (4) auf die Stiftauflage (1) geschraubt werden.

2. Montage des Tisches:

Bei der Montage des Tisches orientieren sich die Nummerierungen an der Zusammenbauzeichnung und den Explosionszeichnungen im Anhang A8 bzw. A9. Die Montage des Tisches wird in folgende Abschnitte unterteilt:

-Montage der Rahmen: Zuerst müssen die Aluminiumprofile (9), (10) und (11) mit jeder vier Automatik-Verbindungssatz (17) verbunden werden. Die sechs Aluminiumprofile (12), die als Füße dienen, können dann durch den vier Automatik-Verbindungssatz (17) montiert werden. Danach werden die Stellfüße (13) und die Fußplatte (14) mit vier Schrauben (21) fixiert. Danach werden die vier Abdeckkappen (15) montiert. Die vier Rastbolzen (30) müssen auf den Rastbolzenplatten (7) jeweils durch vier Schrauben (19) fixiert werden. Dann können sie durch vier Schrauben (20) und vier Nutenstein (16) auf dem Rahmen positioniert und fixiert werden. Somit ist der Aufbau des Rahmens vollständig.

-Montage der Behälter: Zuerst werden die zwei Scharniere (28) mit zwei Senkschrauben (18), zwei Scharnierplatten (5) und zwei Muttern (24) auf der Behälter (1) montiert. Dann wird der Bügelgriff (27) am Behälter mit zwei Schrauben (19), zwei Unterlegscheiben (25) und zwei Muttern (24) montiert. Die zwei Bolzenführungsplatten (6) werden dann am Behälter montiert, jeweils mit zwei Schrauben (19), zwei Unterlegscheiben (25) und zwei Muttern (24). Die zwei Halteseile (29) können dann in die entsprechenden Löcher montiert werden, jeweils mit zwei Schrauben (19), zwei Unterlegscheiben (25) und zwei Muttern (24). Danach wird der Behälter auf das Rahmengestell positioniert und durch vier Senkschrauben (18) und vier Nutenstein (16) durch die Scharniere verschraubt. Der letzte Schritt ist die Befestigung der anderen Extremität der Halteseile (29) am Gestell, jeder durch eine Schraube (19) und einen Nutenstein (16). Der Behälter kann dann geschlossen und durch die Rastbolzen gesperrt werden. Der Abstand zwischen Behälter und Rastbolzen kann durch das Lösen der vier Schrauben auf der Rastbolzenplatte eingestellt werden, da die Langlöcher auf der Platte eine Justierung

ermöglichen.

-Montage der Schweißtischplatte: Die Schweißplatte (8) muss auf dem Rahmen positioniert und durch die vier Fixierungsbohrungen mit den vier Plattenmontageschrauben, vier Distanzmuttern (23), vier Unterlegscheiben (26) und vier Schrauben (28) an den Aluminiumprofilen des Rahmens befestigt werden.

Die Plamaschneidaufnahmen (3) und (4) sowie die Kalibrierspitze (2) können dann bei Bedarf auf die Löcher des Schweißtisches positioniert werden.

A6. Montage Hinweise

Die verschiedenen Fertigungszeichnungen wurden an die Werkstatt übermittelt. Zusätzlich wurden die benötigten Teile bestellt und konstruiert. Nachdem die Teile angekommen waren, begann der Zusammenbau des Tisches. Die Schweißplatte hat ein sehr hohes Gewicht und darf daher nicht von den Mitarbeitern manuell gehandhabt werden. Deshalb wurde entschieden, die Platte mit einem Kransystem auf dem Gestell zu positionieren. Diese Positionierung erfolgte jedoch außerhalb der Roboterzelle, da der Kran nicht über die Roboterzelle fahren kann. Die Abbildung A.1 zeigt den Montageprozess der Platte.

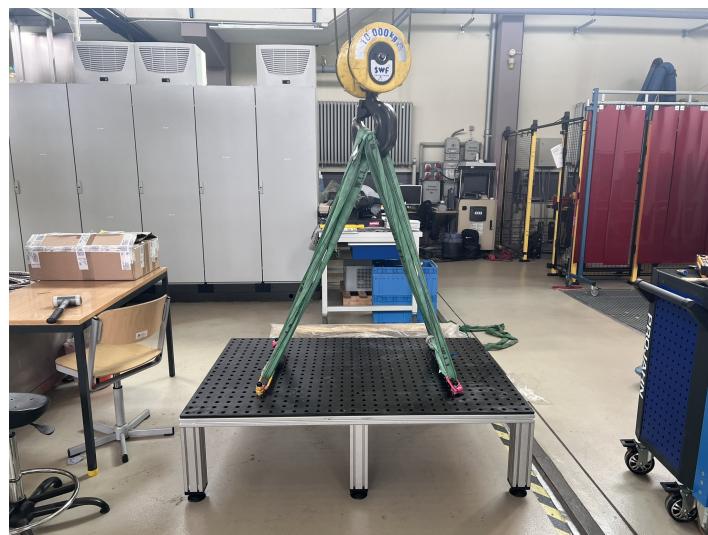


Abbildung A.1.: Prozess der Montage der Plasmaschweißplatte mit dem Kran

Nachdem die Platte positioniert war, wurde der Tisch mit einem Hubwagen in die Roboterzelle geschoben. Der Tisch musste präzise positioniert werden. Dafür wurden die Roboter über den Tisch gefahren, um sicherzustellen, dass sie den Tisch gut erreichen. Nachdem die beste Position gefunden wurde, wurde die Höhe durch die Stellfüße kalibriert. Anschließend wurde er am Boden verschraubt. Die Abbildung A.2 zeigt den montierten Tisch in der Roboterzelle.

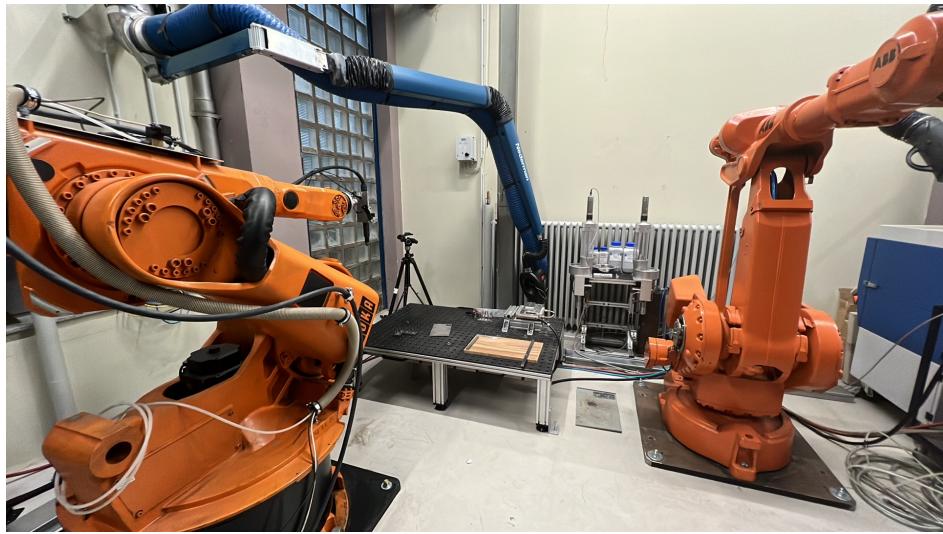


Abbildung A.2.: Positionierung des Tisches in der Roboterzelle

Um das Tooling eines Roboters zu kalibrieren, wird eine Kalibrierspitze benötigt. Diese wird auf dem Schweißtisch befestigt. Danach muss der Roboter in den Kalibriermodus versetzt werden. Im Kalibriermodus bewegt man den Roboter zu den festgelegten Referenzpunkten auf dem Tisch, um die genauen Positionen zu speichern.

Die Plasmaschneidaufnahme und die Behälter wurden anschließend von der Werkstatt geliefert. Die Behälter mussten vermessen und auf dem Tisch positioniert werden, um zu prüfen, ob sie die richtigen Dimensionen haben. Danach wurden sie mit Klemmen positioniert und auf dem Tisch fixiert, um die Bohrungen für die Rastbolzen und die Scharniere zu markieren. Diese waren nicht vorgebohrt, um eine präzise Montage zu gewährleisten und die Möglichkeit zur Kompensation von Konstruktionsfehlern zu bieten. Nachdem die Markierungen vorgenommen wurden, wurden die Bohrungen gebohrt und anschließend die Behälter montiert, wie in der Abbildung A.3 zu sehen ist.

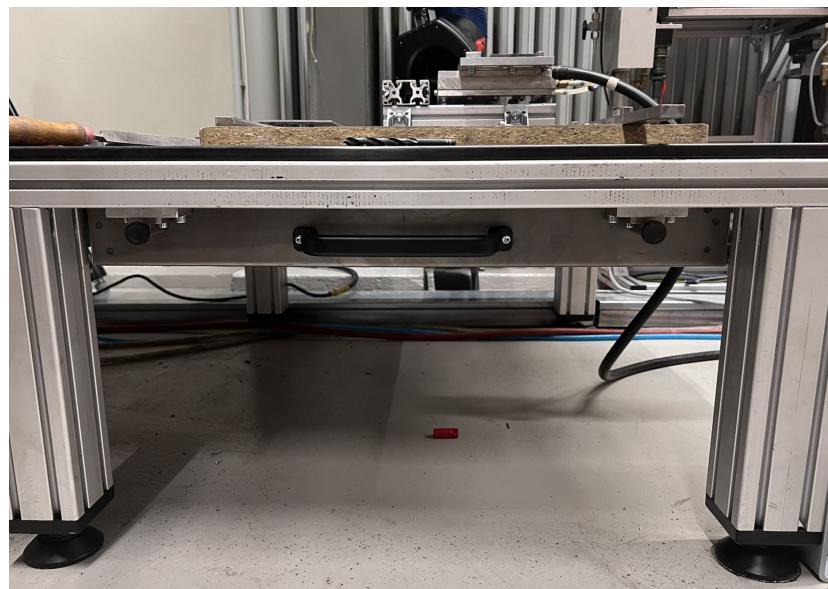


Abbildung A.3.: Montierte Behälter

Fertigungshinweise:

Die Bolzenführungsplatte und die Halteseile sowie die Scharnierplatte wurden bis zum Ende des Projekts nicht montiert. Als Ergebnis musste die Bolzenplatte verkürzt werden, um die Bedienbarkeit der Rastbolzen zu vereinfachen.

Die runden Plasmaschneidaufnahmen wurden bis zum Ende des Projekts noch nicht produziert.

A7. Python Code für die Visualisierung der maximalen Temperatur

```
1 import cv2 #[https://docs.opencv.org/4.x/index.html]
2 import numpy as np #[https://numpy.org/doc/stable/]
3 import os #[https://docs.python.org/3/library/os.html]
4 #[https://matplotlib.org/stable/users/explain/colors/colormaps.html]
5 import matplotlib.pyplot as plt
6 from matplotlib.cm import ScalarMappable
7 from matplotlib.colors import Normalize
8 import pandas as pd #[https://pandas.pydata.org/docs/]
9
10 # Videodatei ffnen
11 video_path = r"C:\Users\yassine\Nextcloud\BA MB\Versuche\
12     Kraiem_Plasmacut_2_Gray.avi"
13
14 cap = cv2.VideoCapture(video_path)
15
16 if not cap.isOpened():
17     print("Fehler: Konnte das Video nicht ffnen .")
18     exit()
19
20 # Variablen initialisieren
21 max_temp = float('-inf') # Maximale Temperatur initialisieren
22 max_temp_location = None # Standort der maximalen Temperatur initialisieren
23 frame_with_max_temp = None # Variable zum Speichern des Frames mit der
24     maximalen Temperatur
25 time_with_max_temp = None # Variable zum Speichern der Zeit des Frames mit
26     der maximalen Temperatur
27 frame_count = 0 # Frame-Z hler initialisieren
28
29 # Liste zum Speichern der maximalen Temperatur jedes Frames
30 max_temps_per_frame = []
31
32 # Frame-Rate des Videos abrufen
33 fps = cap.get(cv2.CAP_PROP_FPS)
34
35 # Liste zum Speichern von Frame-Nummer, Zeit und Temperatur
36 data = []
37
38 while cap.isOpened():
39     ret, frame = cap.read()
40     frame_count += 1
41     if not ret:
42         break
43
44     # Frame in Graustufen konvertieren
45     gray_frame = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
```

```
44     # Graustufen-Frame auf [0, 1000] f r die Temperaturvisualisierung
45     # normalisieren
46     temperatures = gray_frame.astype(float) * (1000.0 / 255.0)
47
48     # Maximale Temperatur und ihren Standort im aktuellen Frame finden
49     current_max_temp = np.max(temperatures)
50     current_max_temp_location = np.unravel_index(np.argmax(temperatures),
51         temperatures.shape)
52
53     # Maximale Temperatur f r diesen Frame speichern
54     max_temps_per_frame.append(current_max_temp)
55
56     # Daten f r Excel hinzuf gen
57     data.append([frame_count, frame_count / fps, current_max_temp])
58     # Globale maximale Temperatur und ihren Standort aktualisieren
59     if current_max_temp > max_temp:
60         max_temp = current_max_temp
61         max_temp_location = current_max_temp_location
62         frame_with_max_temp = frame.copy()
63         time_with_max_temp = frame_count / fps
64
65     # Extrahiere den Dateinamen
66     video_name = os.path.splitext(os.path.basename(video_path))[0]
67
68     # Erstellen des Ausgabeordners
69     output_dir = os.path.join(os.path.dirname(video_path), f'output_{video_name}')
70     os.makedirs(output_dir, exist_ok=True)
71
72     # Excel-Datei speichern
73     excel_output_path = os.path.join(output_dir, f'{video_name}_temperature_data.
74         xlsx')
75     df.to_excel(excel_output_path, index=False)
76     print(f"Temperaturdaten in Excel gespeichert unter: {excel_output_path}")
77
78     if frame_with_max_temp is not None:
79         # Original-Frame mit der maximalen Temperatur speichern
80         original_output_path = os.path.join(output_dir, f'{video_name}
81             _original_frame_with_max_temp.png')
82         cv2.imwrite(original_output_path, frame_with_max_temp, [cv2.
83             IMWRITE_PNG_COMPRESSION, 0])
```

```
84
85     # Frame in Graustufen konvertieren
86     gray_frame_with_max_temp = cv2.cvtColor(frame_with_max_temp, cv2.
87         COLOR_BGR2GRAY)
88
89     # Farbtabellen definieren
90     colormaps = ['gray', 'viridis', 'plasma']
91
92     for cmap_name in colormaps:
93         # Graustufen in die aktuelle Farbkarte konvertieren, um farbige
94             # Markierungen zu zeichnen
95         colored_frame_with_max_temp = plt.get_cmap(cmap_name)(
96             gray_frame_with_max_temp / 255.0)[:, :, :3] * 255
97         colored_frame_with_max_temp = colored_frame_with_max_temp.astype(np.
98             uint8)
99
100        # Dimensionen des Frames abrufen, um Text zu platzieren
101        height, width, _ = colored_frame_with_max_temp.shape
102
103        # Markierung und Text auf dem gespeicherten Frame zeichnen
104        cv2.circle(colored_frame_with_max_temp, (max_temp_location[1],
105            max_temp_location[0]), 5, (255, 0, 0), 2)
106        cv2.putText(colored_frame_with_max_temp, f"Max Temp: {max_temp:.2f}",
107            (10, height - 40), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.5, (255, 255, 255),
108            1, cv2.LINE_AA)
109        cv2.putText(colored_frame_with_max_temp, f"Zeit: {time_with_max_temp
110            :.2f}s", (10, height - 20), cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 0.5, (255,
111            255, 255), 1, cv2.LINE_AA)
112
113        edited_output_path = os.path.join(output_dir, f"{video_name}
114            _edited_frame_with_max_temp_{cmap_name}.png")
115        cv2.imwrite(edited_output_path, cv2.cvtColor(
116            colored_frame_with_max_temp, cv2.COLOR_RGB2BGR), [cv2.
117            IMWRITE_PNG_COMPRESSION, 0])
118        print(f"Bearbeitetes Frame mit der maximalen Temperatur gespeichert
119            unter: {edited_output_path}")
120
121        # Plot für das Frame mit der maximalen Temperatur und die Farbleiste
122        fig, ax = plt.subplots(1, 2, figsize=(10, 6), gridspec_kw={
123            'width_ratios': [1, 0.05]})
124
125        # Frame mit der maximalen Temperatur anzeigen
126        ax[0].imshow(colored_frame_with_max_temp)
127        ax[0].axis('off')  # Achsen ausblenden
128
129        # Farbleiste erstellen
130        norm = Normalize(vmin=0, vmax=1000)
```

```
117     sm = ScalarMappable(norm=norm, cmap=cmap_name)
118     sm.set_array([])
119     cbar = fig.colorbar(sm, cax=ax[1])
120     cbar.set_label('Temperatur C', fontsize=14)
121     cbar.ax.tick_params(labelsize=12)
122
123     # Markierung der maximalen Temperatur auf der Farbleiste mit blauer
124     # Farbe
125     y_max_temp = (max_temp / 1000.0) * cbar.ax.get_ylim()[1]
126     cbar.ax.hlines(y=y_max_temp, xmin=0, xmax=1, color='blue', linewidth
127                     =2)
128     cbar.ax.text(-0.2, y_max_temp, f'{max_temp:.2f}', color='blue', va=
129                   'center', ha='right', fontsize=16)
130
131
132     # Plot f r maximale Temperatur in jedem Frame
133     fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 6))
134     ax.plot(np.arange(1, len(max_temps_per_frame) + 1) / fps,
135             max_temps_per_frame)
136     ax.set_xlabel('Zeit (s)', fontsize=16)
137     ax.set_ylabel('Maximale Temperatur (C)', fontsize=16)
138     ax.tick_params(axis='both', which='major', labelsize=12)
139     ax.grid(True) # Gitter zum Plot hinzuf gen
140     plt.tight_layout()
141     plt.savefig(os.path.join(output_dir, 'max_temperature_each_frame.png'))
142     plt.close()
143
144 print(f"Die maximale Temperatur im Video betr gt: {max_temp:.2f} an Position
145       {max_temp_location}")
```



Abbildung A.4.: Versuch 1 - Frame mit maximaler Temperatur Colorbar Grey



Abbildung A.5.: Versuch 1 - Frame mit maximaler Temperatur Colorbar Plasma



Abbildung A.6.: Versuch 1 - Frame mit maximaler Temperatur Colorbar Viridis

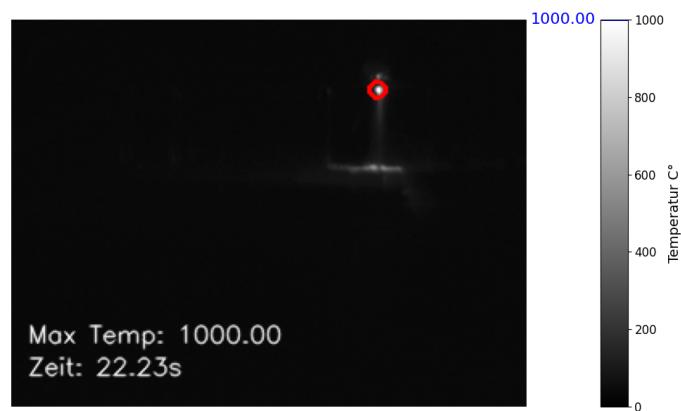


Abbildung A.7.: Versuch 2 - Frame mit maximaler Temperatur Colorbar Grey

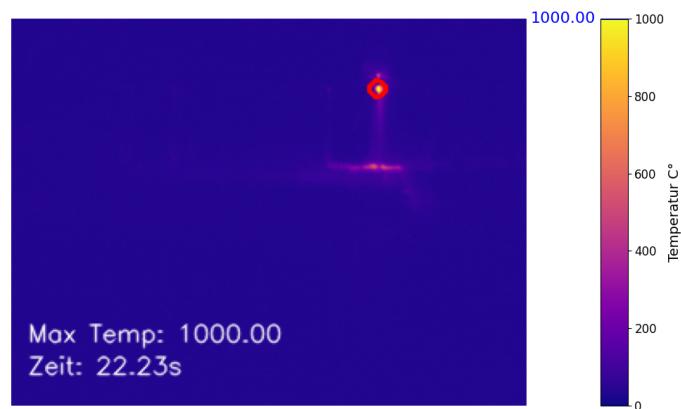


Abbildung A.8.: Versuch 2 - Frame mit maximaler Temperatur Colorbar Plasma

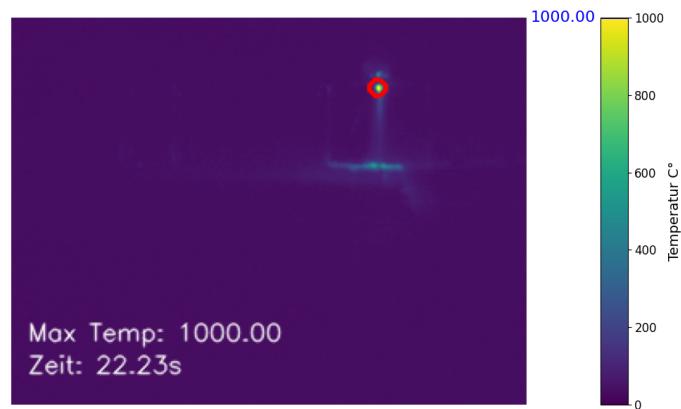
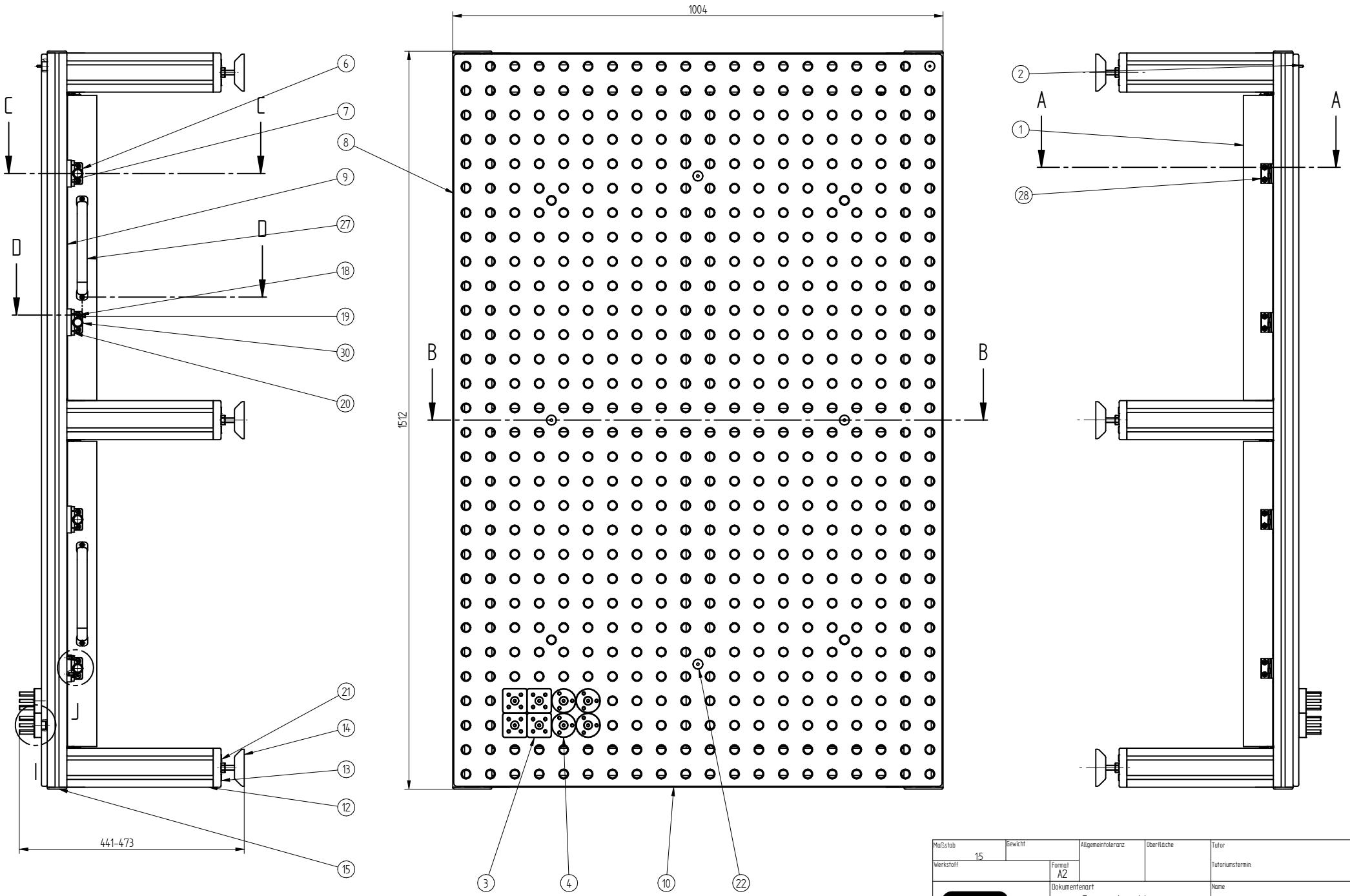


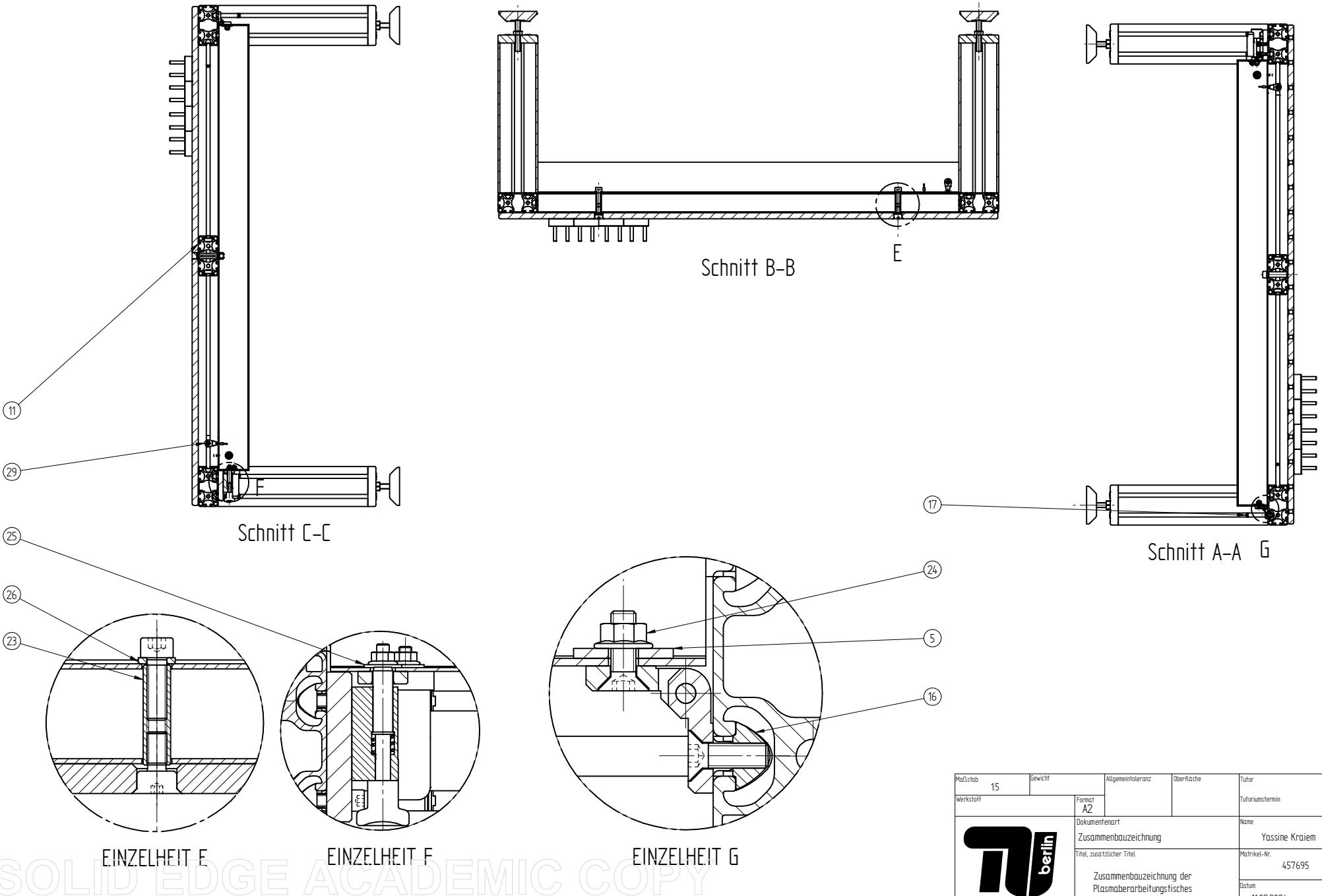
Abbildung A.9.: Versuch 2 - Frame mit maximaler Temperatur Colorbar Viridis



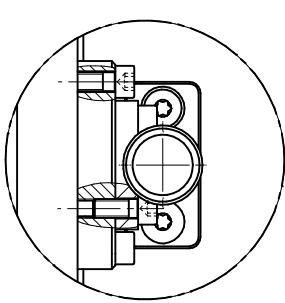
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

| Maßstab | Gewicht | Allgemeintoleranz | Überfläche | Tutor |
|-----------|---------------------------|---------------------------|------------|-----------------|
| Werkstoff | Format | | | Tutoriumstermin |
| 15 | A2 | | | |
| | Dokumentenart | Zusammenbauzeichnung | | Name |
| | | | | Yassine Kraiem |
| | Titel, zusätzlicher Titel | | | Matrikel-Nr. |
| | | Zusammenbauzeichnung der | | 457695 |
| | | Plasmabearbeitungsfisches | | |
| | Datum | Blatt | von | |
| | 11.02.2024 | 1 | 3 | |

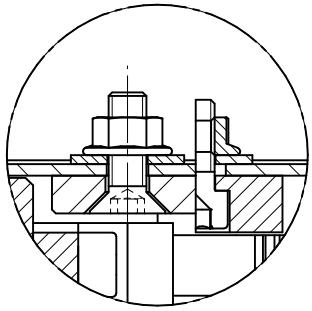




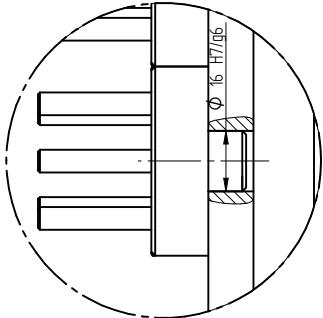
| Maßstab | 15 | Gewicht | | Allgemeintoleranz | Oberfläche | Tutor |
|---------------------|------------|----------------------------|----|-------------------|------------|-----------------|
| Werkstoff | | Format | A2 | | | Tutoriumstermin |
| TU berlin | | Dokumentenart | | | | Name |
| | | Zusammenbauzeichnung | | | | Yassine Kraiem |
| | | Titel, zusätzlicher Titel | | | | Matrikel-Nr. |
| | | | | | | 457695 |
| | | Zusammenbauzeichnung der | | | | |
| | | Plasmaberarbeitungstisches | | | | |
| Datum | 11.02.2024 | Blatt | 2 | von | 3 | |



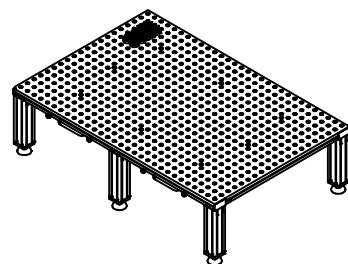
EINZELHEIT J



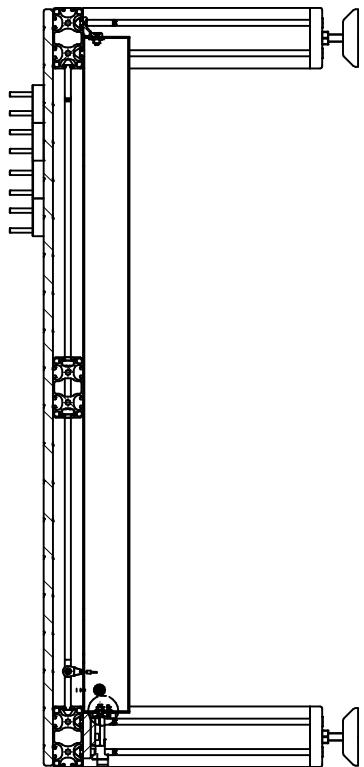
EINZELHEIT H



EINZELHEIT I



ISOMETRISCHE DAESTELLUNG 1/10



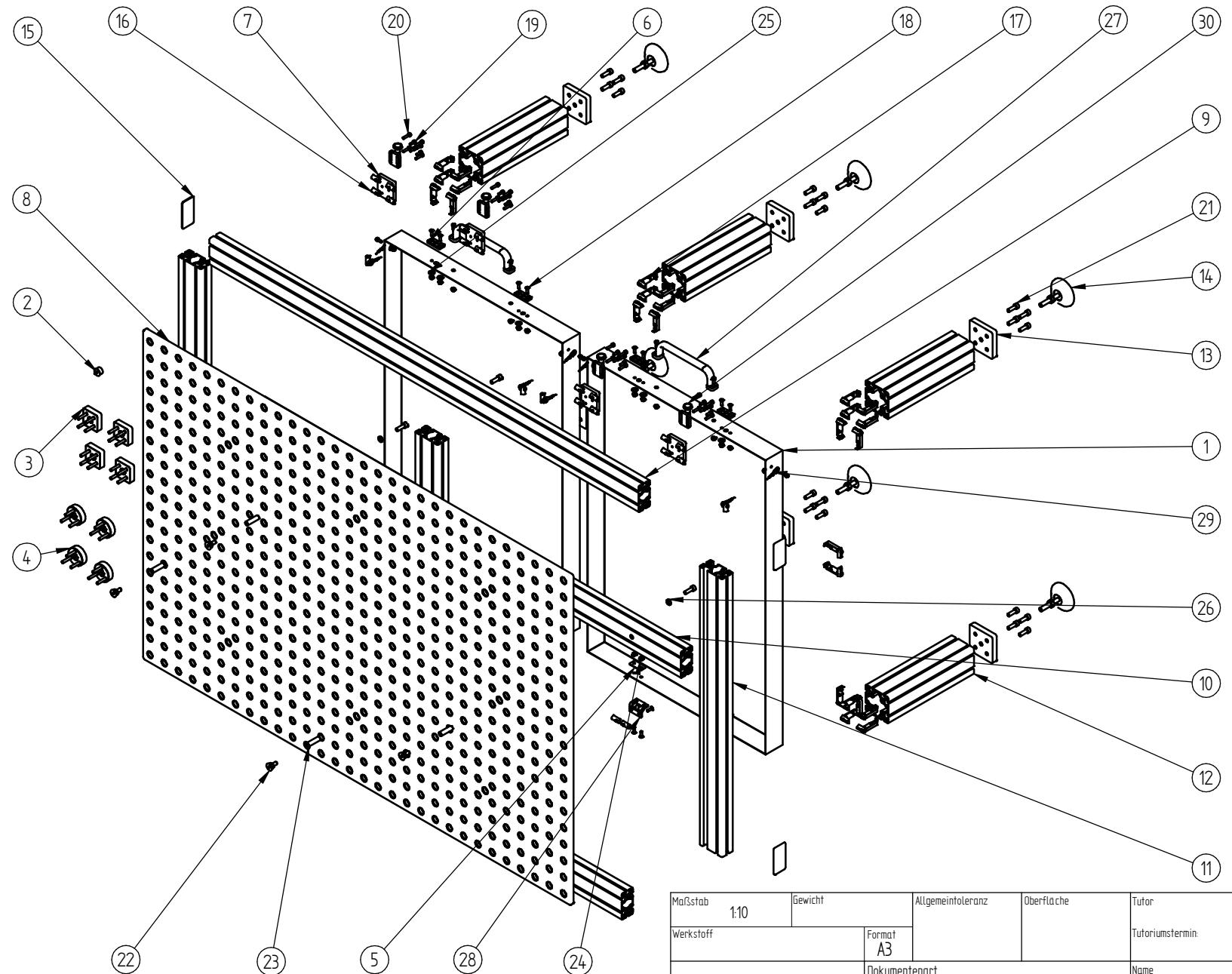
Schnitt D-D

| Passmaß | Toleranzbezeichnung | Abmaße | Spiel/Übermaß |
|-----------------|---------------------|------------------|-------------------|
| $\phi 16$ H7/g6 | H7 | +0,018 +0,000 | max. Spiel: 0,035 |
| | g6 | -0,006 -0,017 | Min. Spiel: 0,006 |

| Pos | Me | Benennung | Sachnummer/Norm-Kurzbezeichnung | Bemerkung |
|-----|----|---------------------------|----------------------------------|------------|
| 1 | 2 | Behalter | | |
| 2 | 1 | Kalibrierspitzen | | |
| 3 | 4 | Plasmaschweißstool Eckig | | |
| 4 | 4 | Plasmaschweißstool Rund | | |
| 5 | 4 | Scharniereplatte | | |
| 6 | 8 | Bolzenführungsplatte | | |
| 7 | 4 | Rastbolzenplatte | | |
| 8 | 1 | Schweißplatte | Lochplatte X8.7 1500x1000x12 | |
| 9 | 2 | Aluprofil 1504 | Item 8 80x40x1504 | |
| 10 | 3 | Aluprofil 844 | Item 8 80x40x844 | |
| 11 | 2 | Aluprofil 632 | Item 8 80x40x632 | |
| 12 | 6 | Aluprofil 300 | Item 8 80x80x300 | |
| 13 | 6 | Fußplatte | Item Fußplatte 8 80x80 M10 | |
| 14 | 6 | Stellfuß | Item Stellfuß D80, M10x80 | |
| 15 | 4 | Abdeckkappe | Item Abdeckkappe 8 80x40 | |
| 16 | 24 | Nutenstein | Item Nutstein St M5, rostfrei | |
| 17 | 52 | Automatik-Verbindungssatz | Item Automatik Verbindungssatz 8 | |
| 18 | 24 | Senkschraube | DIN 4762 M5x16 | |
| 19 | 28 | Innensechkantschrauben | ISO 4762 M5x12 | |
| 20 | 16 | Innensechkantschrauben | ISO 4762 M5x20 | |
| 21 | 28 | Innensechkantschrauben | ISO 4762 M8x25 | |
| 22 | 4 | Plattemontageschraube | Siegmuds Montageschraube 16+28 | 2-00002594 |
| 23 | 4 | Distanzmutter | Distanzmutter rund M 8x40 | |
| 24 | 24 | Mutter M5 | DIN 6923 M5 | |
| 25 | 12 | Unterlegscheiben | DIN 9021 M5 | |
| 26 | 4 | Unterlegscheiben | DIN 9021 M8 | |
| 27 | 2 | Buegelgriff | GN 668-20-190-B-SW | |
| 28 | 4 | Scharniere | GN 237-ZD-40-40-A-CR | |
| 29 | 4 | Halteseile | GN 111_2-200-C-BL-3 | |
| 30 | 4 | Rastbolzen | GN 417-8-C-NI | |

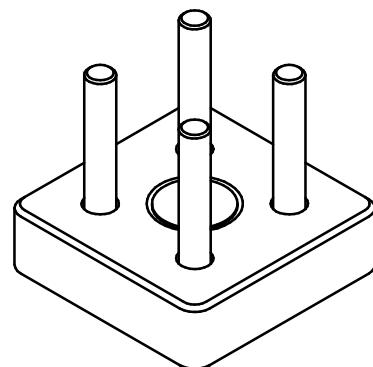
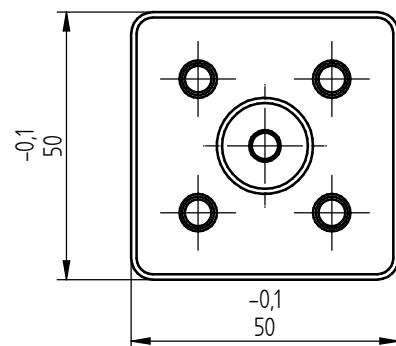
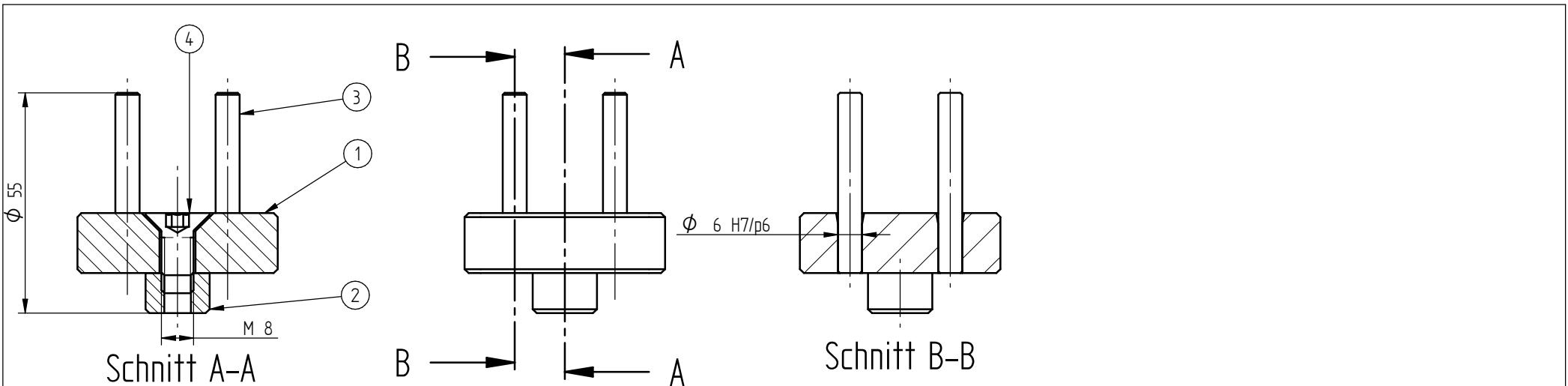
| Maßstab | Gewicht | Allgemeintoleranz | Überfläche | Tutor |
|-----------|-----------|---------------------------|------------|------------------|
| 15 | | | | Tutoriumstermin: |
| Werkstoff | Format A2 | | | |
| | | Dokumentenart | | Name |
| | | Zusammenbauzeichnung | | Yassine Kraiem, |
| | | Titel, zusätzlicher Titel | | Matrikel-Nr. |
| | | Zusammenbauzeichnung der | | 457695 |
| | | Plasmabearbeitungstisches | | |
| | | | | |
| | | Datum | Blatt | von |
| | | 11.02.2024 | 1 | 3 |





| | | | | | |
|--|------|---------|-------------------|------------|---------------------|
| Maßstab | 1:10 | Gewicht | Allgemeintoleranz | Oberfläche | Tutor |
| Werkstoff | | Format | A3 | | Tutoriumstermin: |
| Dokumentenart | | | | | Name |
| Explosionszeichnung | | | | | Yassine Kraiem |
| Titel, zusätzlicher Titel | | | Matrikel-Nr. | 457695 | |
| Explosionszeichnung der Plasmabearbeitungstisches | | | Datum | 11.02.2024 | Blatt 1 von 1 |





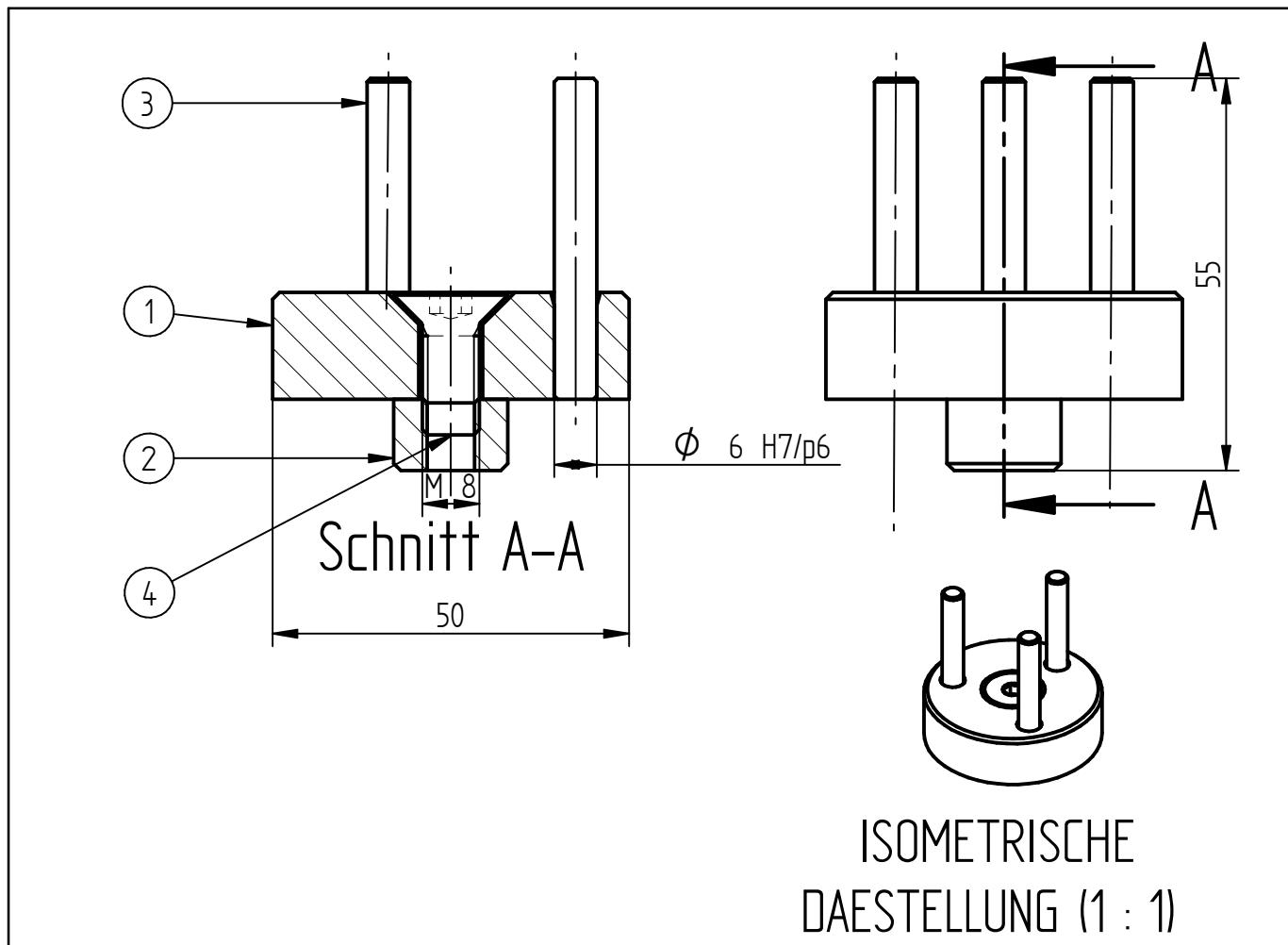
ISOMETRISCHE DAESTELLUNG (1 : 1)

| Passmaß | Toleranzbezeichnung | Abmaße | Spiel/Übermaß |
|----------------|---------------------|-------------------|----------------------|
| ϕ 6 H7/p6 | H7 | +0,012 +0,000 | max. Übermass: 0,02 |
| | p6 | +0,002 +0,0012 | Min. Übermass: 0,000 |

| Pos. | Anzahl | Benennung | Sachnummer | Bemerkung |
|------|--------|----------------|----------------|-----------|
| 1 | 1 | Stifteauflage | | |
| 2 | 1 | Mutter | | |
| 3 | 4 | Zylinderstifte | DIN 7 4 x 40 | |
| 4 | 1 | Senkschraube | DIN 7991 M8x20 | |

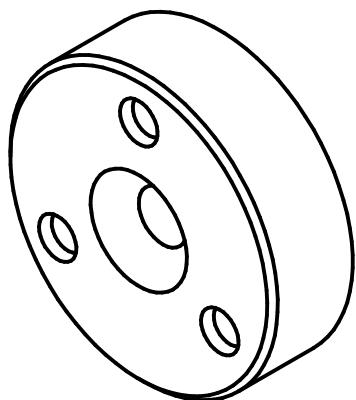
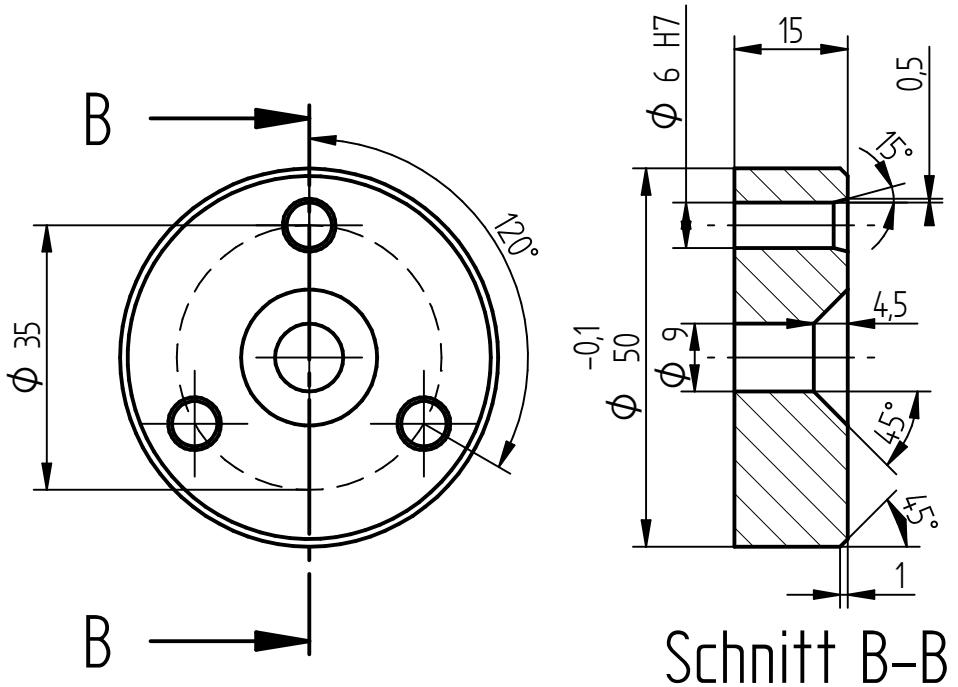
| | | | | |
|--|--------------|-------------------|------------------------|------------------|
| Maßstab 1:1 | Gewicht | Allgemeintoleranz | Oberfläche | Tutor |
| Werkstoff | Format A3 | | | Tutoriumstermin: |
| Dokumentenart Zusammenbauzeichnung | | | Name Yassine Kraiem | |
| Titel, zusätzlicher Titel Plasmaschneidaufnahme Eckig | | | Matrikel-Nr. 457695 | |
| Datum 06.04.2024 | | Blatt 1 | von 1 | |





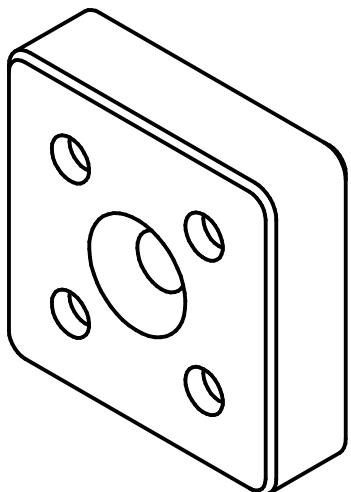
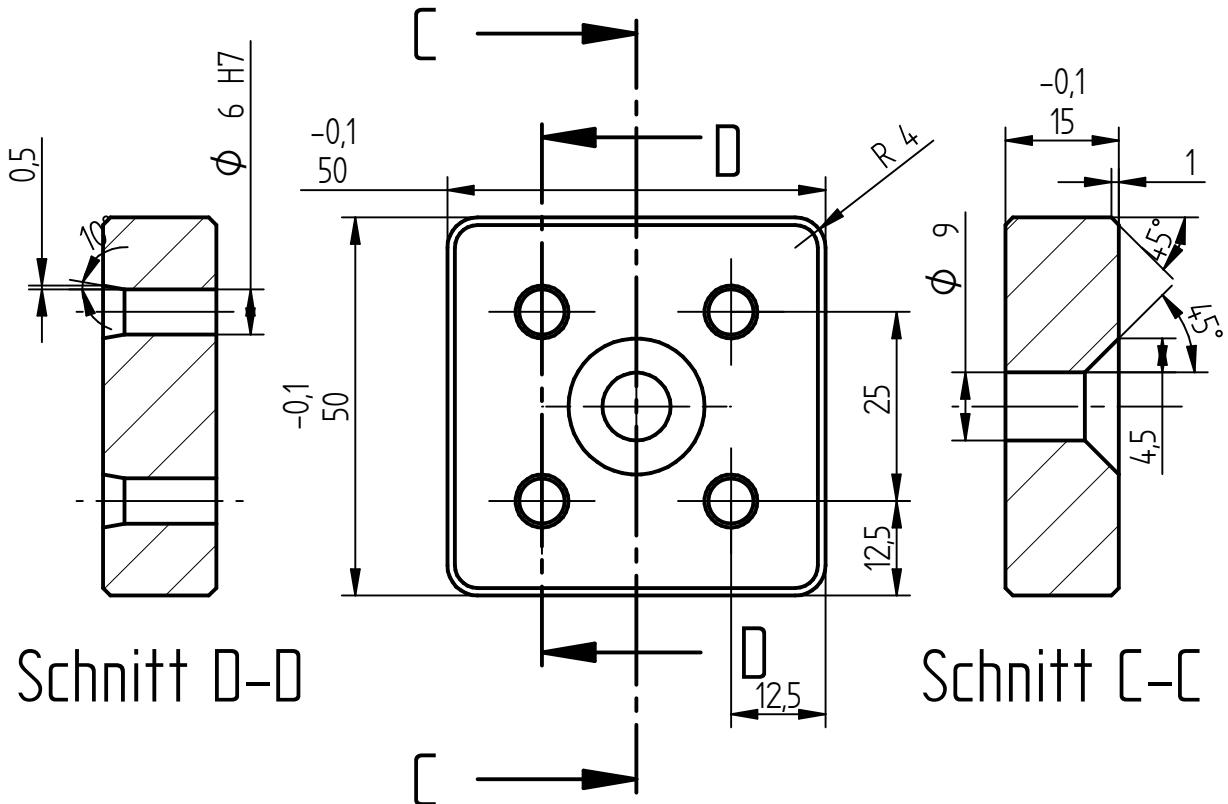
| Passmaß | | Toleranzbezeichnung | | Abmaße | Spiel/Übermaß |
|------------------------|--------|---------------------|--|-------------------|----------------------|
| $\phi 6 \text{ H7/p6}$ | | H7 | | +0,012 +0,000 | max. Übermass: 0,02 |
| | | p6 | | +0,002 +0,0012 | Min. Übermass: 0,000 |
| Pos. | Anzahl | Benennung | | Sachnummer | Bemerkung |
| 1 | 1 | Stifteauflage | | | |
| 2 | 1 | Mutter | | | |
| 3 | 3 | Zylinderstifte | | DIN 7 4 x 40 | |
| 4 | 1 | Senkschraube | | DIN 7991 M8x20 | |

| | | | | |
|---|---|-------------------|------------|------------------------|
| Maßstab 1:1 | Gewicht | Allgemeintoleranz | Oberfläche | Tutor |
| Werkstoff | Format A4 | | | Tutoriumstermin: |
|  | Dokumentenart Zusammenbauzeichnung | | | Name Yassine Kraiem |
| | Titel, zusätzlicher Titel Plasmaschneidaufnahme Rund | | | Matrikel-Nr. 457695 |
| | Datum 06.04.2024 | | Blatt 1 | von 1 |



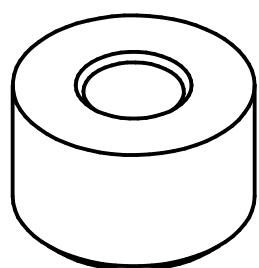
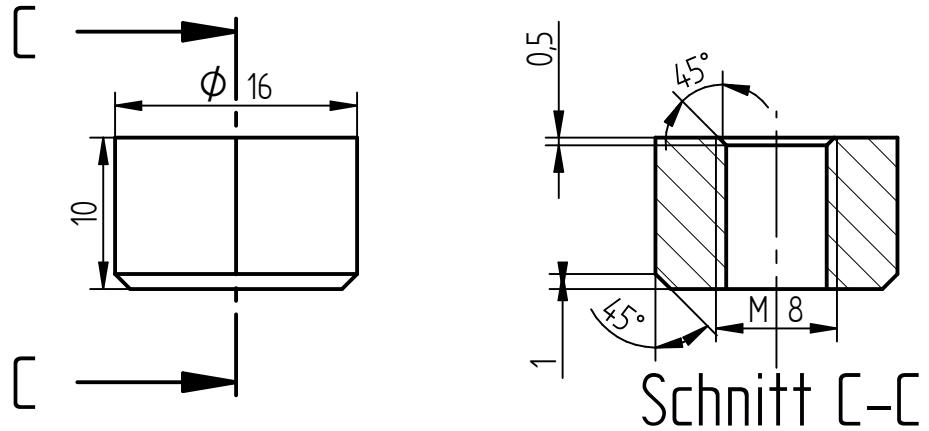
ISOMETRISCHE DAESTELLUNG (1 : 1)

| | | | | |
|---|--------------|---|----------------------------|---------------------------|
| Maßstab 1:1 | Gewicht | Allgemeintoleranz DIN ISO 2768 - mK | Oberfläche DIN ISO 1302 | Tutor Tutoriumstermin: |
| Werkstoff Stahl | Format A4 | Dokumentenart Fertigungszeichnung | | |
|  | | Name Yassine Kraiem | | |
| Titel, zusätzlicher Titel Stifteauflage Rund | | Matrikel-Nr. 457695 | | |
| | | Datum 06.04.2024 | Blatt 1 | von 1 |



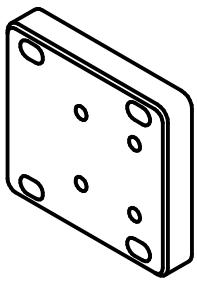
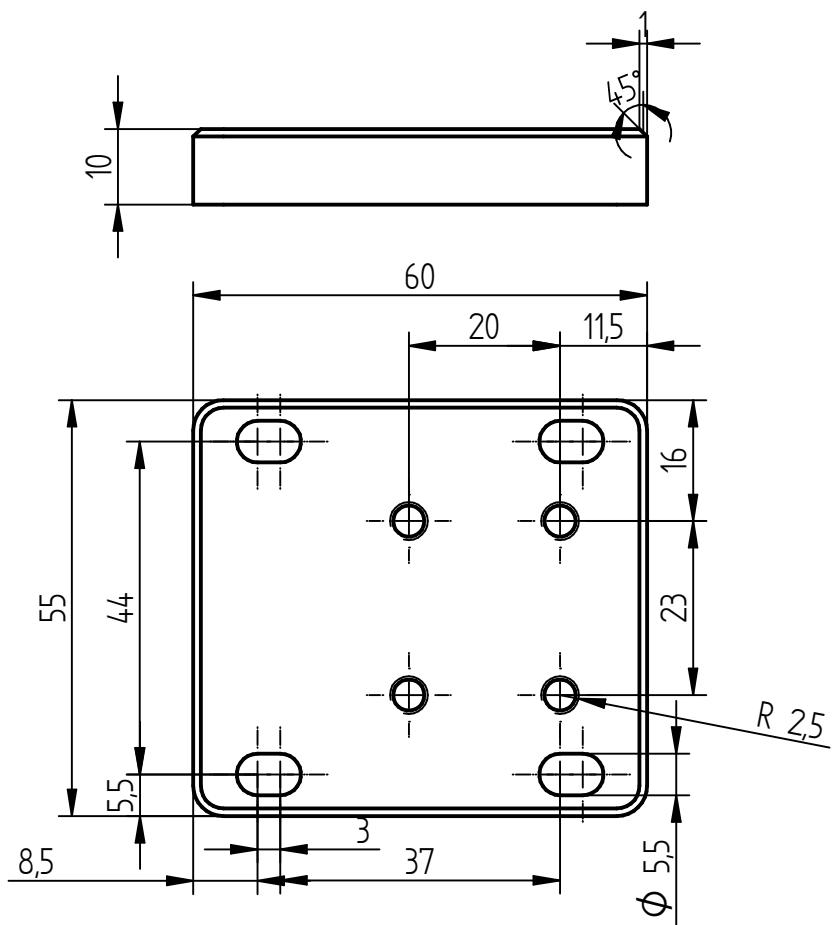
ISOMETRISCHE
DAESTELLUNG (1 : 1)

| | | | | | |
|---|--|-------------------------|---|----------------------------|---------------------------|
| Maßstab | 1:1 | Gewicht | Allgemeintoleranz DIN ISO 2768 - mK | Oberfläche DIN ISO 1302 | Tutor Tutoriumstermin: |
| Werkstoff | Präzisionsstahl | Format A4 | | | |
|  | Dokumentenart Fertigungszeichnung | | Name Yassine Kraiem | | |
| | Titel, zusätzlicher Titel Stifteauflage Eckig | | Matrikel-Nr. 457695 | | |
| | | Datum 06.04.2024 | Blatt 1 | von 1 | |



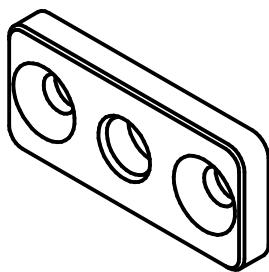
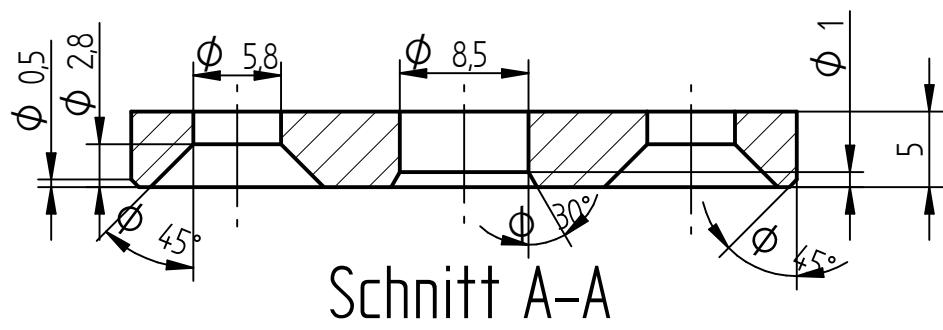
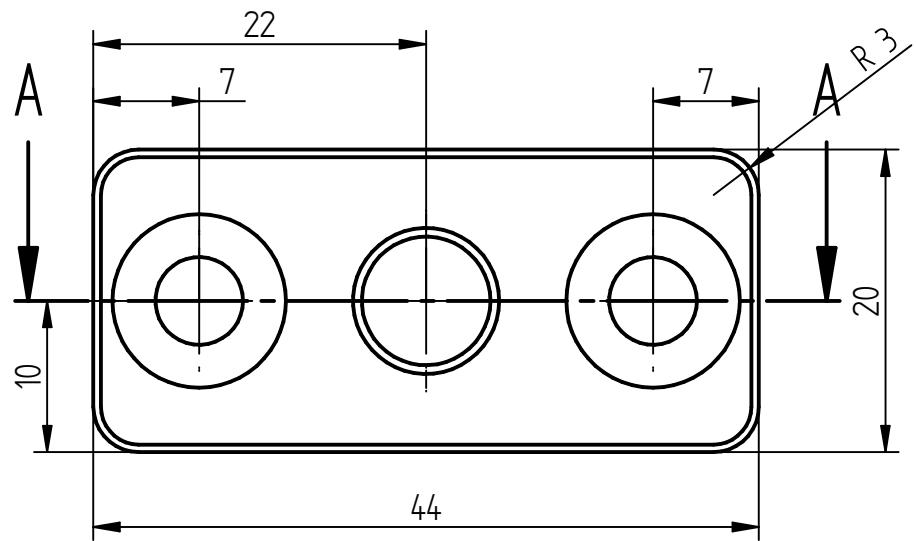
ISOMETRISCHE DARSTELLUNG (2 : 1)

| | | | | |
|--|--------------|---|----------------------------|---------------------------|
| Maßstab 2:1 | Gewicht | Allgemeintoleranz DIN ISO 2768 - mK | Oberfläche DIN ISO 1302 | Tutor Tutoriumstermin: |
| Werkstoff Stahl | Format A4 | Dokumentenart Fertigungszeichnung | | |
| | | Name Yassine Kraiem | | |
| Titel, zusätzlicher Titel Mutter | | Matrikel-Nr. 457695 | | |
| Datum 06.04.2024 | | Blatt 1 | von 1 | |



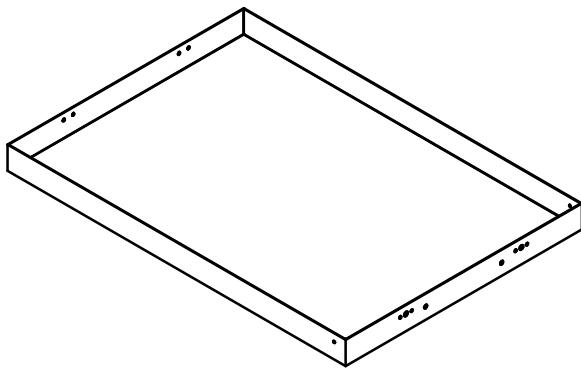
ISOMETRISCHE DAESTELLUNG (1 : 2)

| | | | | |
|---|--------------|---|----------------------------|---------------------------|
| Maßstab 1:1 | Gewicht | Allgemeintoleranz DIN ISO 2768 - mK | Oberfläche DIN ISO 1302 | Tutor Tutoriumstermin: |
| Werkstoff Stahl | Format A4 | Dokumentenart Fertigungszeichnung | | |
| | | Name Yassine Kraiem | | |
| Titel, zusätzlicher Titel Rastbolzenplatte | | Matrikel-Nr. 457695 | | |
| Datum 06.04.2024 | | Blatt 1 | von 1 | |

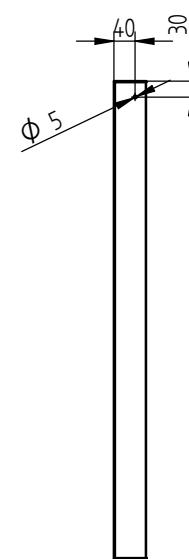
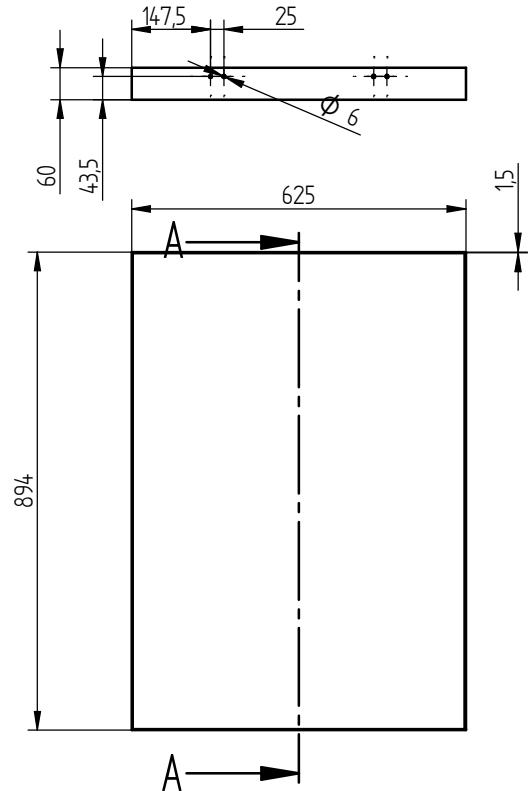


ISOMETRISCHE DAESTELLUNG (1 : 1)

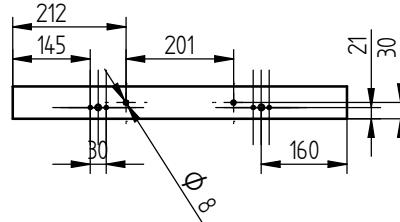
| | | | | |
|---|--------------|---|----------------------------|---------------------------|
| Maßstab 2:1 | Gewicht | Allgemeintoleranz DIN ISO 2768 - mK | Oberfläche DIN ISO 1302 | Tutor Tutoriumstermin: |
| Werkstoff Stahl | Format A4 | Dokumentenart Fertigungszeichnung | | |
| | | Name Yassine Kraiem | | |
| Titel, zusätzlicher Titel Bolzenführungsplatte | | Matrikel-Nr. 457695 | | |
| Datum 06.04.2024 | Blatt 1 | von 1 | | |



ISOMETRISCHE DAESTELLUNG (1 : 10)



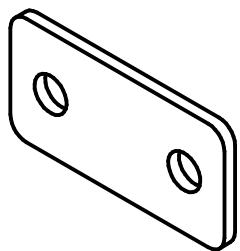
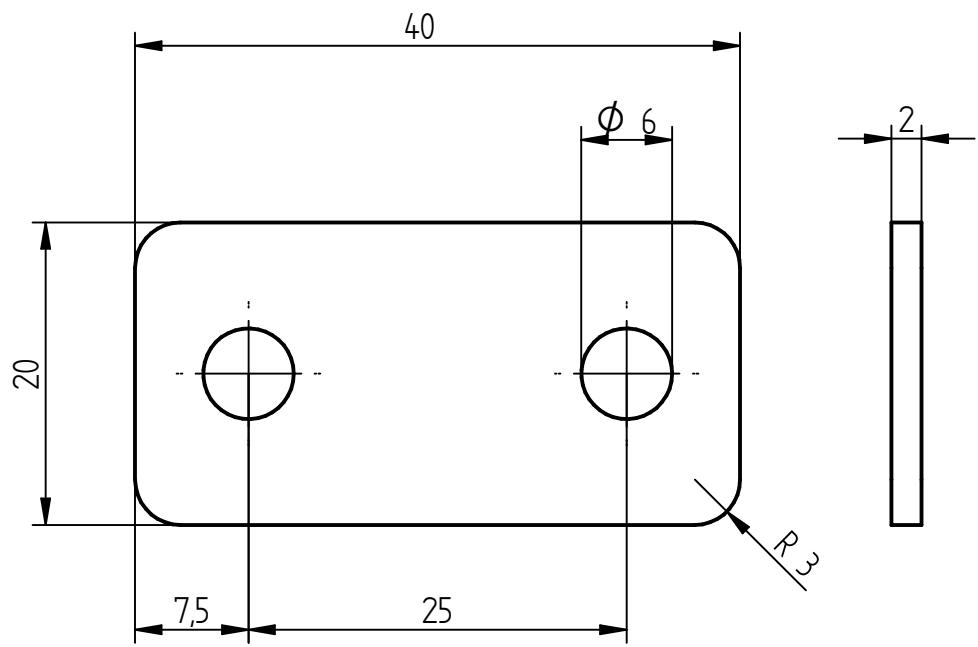
Schnitt A-A



Blechdicke= 1,5 mm

| | | | | | |
|---------------------------|------------|-----------|---------------------|--------------|------------------|
| Maßstab | 1:10 | Gewicht | Allgemeintoleranz | Oberfläche | Tutor |
| Werkstoff | | | DIN ISO 2768 - mK | DIN ISO 1302 | Tutoriumstermin: |
| Stahl | | Format A3 | | | |
| Dokumentenart | | | Fertigungszeichnung | | Name |
| | | | | | Yassine Kraiem |
| Titel, zusätzlicher Titel | | | | Matrikel-Nr. | |
| | | | Behälter | 457695 | |
| Datum | 06.04.2024 | Blatt | | 1 | von |
| | | | | | 1 |





ISOMETRISCHE DAESTELLUNG (1 : 1)

| | | | | |
|---|--------------|---|----------------------------|---------------------------|
| Maßstab 2:1 | Gewicht | Allgemeintoleranz DIN ISO 2768 - mK | Oberfläche DIN ISO 1302 | Tutor Tutoriumstermin: |
| Werkstoff Stahl | Format A4 | Dokumentenart Fertigungszeichnung | | |
| | | Name Yassine Kraiem | | |
| Titel, zusätzlicher Titel Scharniereplatte | | Matrikel-Nr. 457695 | | |
| Datum 06.04.2024 | | Blatt 1 | von 1 | |

A19. Weitere Hinweise

- ChatGPT-4 wurde für die sprachliche Überprüfung verwendet.
- Die Erstellung des Python-Codes wird durch verschiedene Bibliotheken ermöglicht, darunter NumPy, OpenCV, os, Matplotlib und Pandas.
- Das Gantt-Diagramm im Projektplan wurde mit der kostenlosen Version von Team-Gantt erstellt.
- Die gedruckten Zeichnungen sind im A4-Format skaliert. Die Originalversionen sind auf dem beigelegten USB-Stick enthalten.
- Der beigelegte USB-Stick enthält folgende Dateien:
 - Digitale Kopie der Arbeit
 - STEP-Datei des Bearbeitungstisches
 - Die Videoaufnahmen beider Versuche
 - Eine Kopie des Python-Codes
 - Die Ergebnisse des Python-Codes für beide Versuche
- Die verwendete Vorlage für die Arbeit stammt aus folgender Seite: <https://www.tu-berlin/fza/studium-lehre/abschlussarbeiten/vorlage-fuer-abschlussarbeiten>.