



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Verbesserung des Einstechverhaltens beim Laserschneiden durch optimierte Ansteuerung einer Laserstrahlschneidanlage

von

Oliver Halik BSc., Matr.Nr.: 01525986

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur

eingereicht an der

Technischen Universität Wien

Betreuer: Projektass. DI Gerald Humenberger

Unter der Leitung von: a.o. Univ. Prof. DI Dr. Gerhard Liedl

Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien

Wien, August 2021

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit zeigt den Umbau einer CNC-Verfahrenanlage und eines 1,5 kW CO_2 -Lasers dahingehend, dass ungenutzte Funktionen des Lasers nutzbar gemacht werden. Der Bediener ist nun in der Lage auf Pulsfunktionen des Lasers zuzugreifen. Außerdem kann er Laserprogramme aus dem CNC-Programm heraus auswählen und ist so in der Lage den vollen Funktionsumfang des Lasers zu nutzen. Der zweite Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der Optimierung von Einstechprozessen in unterschiedliche Metalle. Es kann gezeigt werden, dass Parameter gefunden werden können, mit denen die Energieeinbringung minimiert werden kann. Bei den meisten Materialien steigert gepulste Laserstrahlung die Effizienz des Einstichvorgangs, wobei das Tastverhältnis eine entscheidende Rolle spielt.

Abstract

This diploma thesis deals with the modification of a CNC-processing machine and a 1,5 kW CO_2 -laser in such a way that until now unused laser-functions can be accessed. The operator now has the possibility to use the laser pulse capabilities. In addition, the operator has the ability to select laser programs within the CNC-program, giving the operator the opportunity to use the full range of laser functions. The second part of the thesis deals with the optimization of laser piercing processes into different metals. It was shown that parameters for minimal energy input into the samples can be found. For most materials, pulsed laser radiation improves the efficiency of the piercing process, whereby the duty cycle plays a decisive role.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	5
1.1. Aufgabenstellung	5
1.2. Methodik, Vorgehensweise, Ziele	5
2. Zusammenführung der Rofin-Lasersteuerung mit der vorhandenen CNC-Verfahrenanlage	6
2.1. Aufnahme des Ausgangszustandes	6
2.1.1. Vorhandene Verkabelung zwischen Laser und CNC-Verfahrenanlage	7
2.1.2. Vorhandene Verkabelung am Laser	8
2.1.3. Vorhandene Verkabelung an der SPS	9
2.1.4. Softwareausgangszustand der CNC-Verfahrenanlage	11
2.2. Neuverkabelung der Steuerungsinstallation am Laser	14
2.2.1. Buskoppler	16
2.2.2. Verdrahtung	16
2.3. Neuverkabelung der CNC-Verfahrenlagenschnittstellen	20
2.3.1. Wegfall alter Installationen	20
2.3.2. Anpassung der SPS	22
2.3.3. Neuverkabelung der Schnittstelle zum Handbediengerät	24
2.4. Not-Aus System	28
2.4.1. Ausgangszustand	28
2.4.2. Anpassungen des Not-Aus Systems	29
2.5. Bedienung am Laserpanel	30
2.6. Softwareanpassungen	32
2.6.1. Neue Hardwarekonfiguration	32
2.6.2. M-Funktionen und M-Parameter	34
2.6.3. Einstellung des Laserprogramms	36
2.6.4. Einstellung der Leistung	38
2.6.5. Einstellung der Pulsfrequenz	39
2.6.6. Einstellung des Tastverhältnisses	39
2.6.7. Dritter Analogausgang der SPS	40
2.7. Visualisierungsanpassungen	41
2.7.1. Infoliste	41
2.7.2. Seite „Main“	43
2.7.3. Seite „Wiki“	43
2.7.4. Seite „Parameter“	45
3. Optimierung des Einstechverhaltens	47
3.1. Motivation	47
3.2. Laserquelle	47
3.2.1. Funktionsweise des CO ₂ -Lasers	47
3.2.2. Ermittlung des Fokusabstands des Laserstrahls	51

3.2.3. Ermittlung der Strahlparameter des Laserstrahls	53
3.3. Stand der Technik	58
3.3.1. Anlagenstand nach dem Umbau	58
3.3.2. Gütekriterien	58
3.3.3. Einstechprozeduren	60
3.4. Versuchsmaterial, Versuchsaufbau	63
3.5. Versuchsablauf	65
3.6. Versuchsergebnisse	66
3.6.1. Einstiche in 1 mm 1.4307	66
3.6.2. Schnitte in 1 mm 1.4307	72
3.6.3. Einstiche in 2 mm 1.4307	73
3.6.4. Schnitte in 2 mm 1.4307	77
3.6.5. Einstiche in 6 mm Baustahl	86
3.6.6. Einstiche in 3 mm Aluminium	91
4. Zusammenfassung und Aussicht	97
4.1. Erkenntnisse und mögliche Optimierungen	97
4.1.1. Anlagenumbau	97
4.1.2. CNC-Code	98
4.1.3. Einstechparameter	100
4.1.4. Visualisierung	103
4.2. Ansätze für weitere Arbeiten	105
4.2.1. Untersuchung des Verhaltens der ausgeblasenen Schmelze	105
Abbildungsverzeichnis	106
Tabellenverzeichnis	109
Literatur	111
A. Anhang	112
A.1. Stromlaufplan, Klemmenplan	112

1. Einleitung

1.1. Aufgabenstellung

Ziel der Arbeit ist die Verbesserung des Einstechverhaltens zu Beginn eines Laserschnitts. Um dies mit der vorhandenen Laserstrahlschneidanlage zu erreichen, muss das Zusammenspiel zwischen den Steuerungen des Lasers und der Verfahrenanlage optimiert werden. Dies kann durch Einbindung zusätzlicher Hardware und Programmierung der Anlagen-SPS erreicht werden. Zur Verifizierung der durchgeführten Arbeiten sind zusätzlich die CNC-Programme anzupassen und Schneidversuche an verschiedenen Materialien durchzuführen.

1.2. Methodik, Vorgehensweise, Ziele

Die Arbeit ist in zwei getrennte Teile geteilt. Der erste Teil der Arbeit widmet sich dem Umbau der elektrischen Installation sowie sämtlichen anderen notwendigen Anpassungsarbeiten an der Kommunikation der beiden Maschinen. Dieser Teil ist praktisch zu absolvieren und hat zum Ziel, alle Funktionen des bereits existierenden Lasers für den zweiten Teil der Arbeit nutzen zu können.

Der zweite Teil der Arbeit widmet sich Einstechprozeduren, unter Verwendung von Laserstrahlung, in unterschiedlichen Metallen. Dabei sollen Verfahren aus der Literatur, mit Hilfe der neuen Funktionen der Laserstrahlschneidanlage, praktisch umgesetzt werden. Zur Verifikation der aus der Literatur gewonnenen Erkenntnisse werden Versuche mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt. Die Zielsetzung hierbei ist es, ein Set an Parametern für das Einstechen in unterschiedliche Metalle mit unterschiedlichen Materialstärken zu bekommen. Die dafür entwickelten Programmabläufe, bzw. Einstechparameter, sollen dokumentiert werden und allen Nutzern der Anlage zur Verfügung gestellt werden.

2. Zusammenführung der Rofin-Lasersteuerung mit der vorhandenen CNC-Verfahrenanlage

2.1. Aufnahme des Ausgangszustandes

Der CO_2 -Laser der Firma Rofin hat eine Leistung von 1500 W und ist Baujahr 2003 (siehe Tab. 3.3, S. 64). Der Rohstrahl wird mehrmals um 90° abgelenkt und in einem geschlossenen Rohr in den Bearbeitungsraum zur CNC-Verfahrenanlage geführt. Dieser abgetrennte Raum ist mit Interlock-Türschaltern gesichert. Die SPS, die Servoverstärker, sowie das Bedienpanel sind neben dem Laser in einem bewegbaren Schaltschrank untergebracht. Der Laser hat ein eigenes Bediengerät, von dem aus Laserprogramme definiert werden können und eine manuelle Steuerung der Hochspannung, des Shuttters und der Strahlfreigabe möglich ist. Von diesem Bediengerät aus können auch analoge Quellen aus dem Schaltschrank des Lasers, als Vorgabe für Leistung und/oder Einschaltdauer, vorgegeben werden.



Abbildung 2.1.: Übersicht der Anlage. V.l.n.r.: Bedienpanel CNC-Verfahrenanlage, Bedienpanel Laser, Laser

Die vorhandene Dokumentation der Verkabelung der bisherigen Ansteuerung des Lasers ist ein Stromlaufplan der Firma, die den Laser davor für das Laserschneiden benutzt hat. Für den Laser an sich gibt es einen Stromlaufplan sowie eine Bedienungsanleitung, in der sämtliche Schnittstellen definiert sind, die für die Ansteuerung des Lasers erforderlich sind.

Die Verkabelung der CNC-Verfahrenanlage ist ebenfalls in einem Stromlaufplan dokumentiert, der aber nicht in allen Punkten mit der realen Verkabelung übereinstimmt.

2.1.1. Vorhandene Verkabelung zwischen Laser und CNC-Verfahrenanlage

Die CNC-Verfahrenanlage ist vor dem Umbau über einen HAN-D Stecker mit rund 65 Adern mit dem Laser verbunden (siehe Abb. 2.2). Bei weitem nicht alle Adern sind jedoch mit der SPS oder dem Laser verbunden.

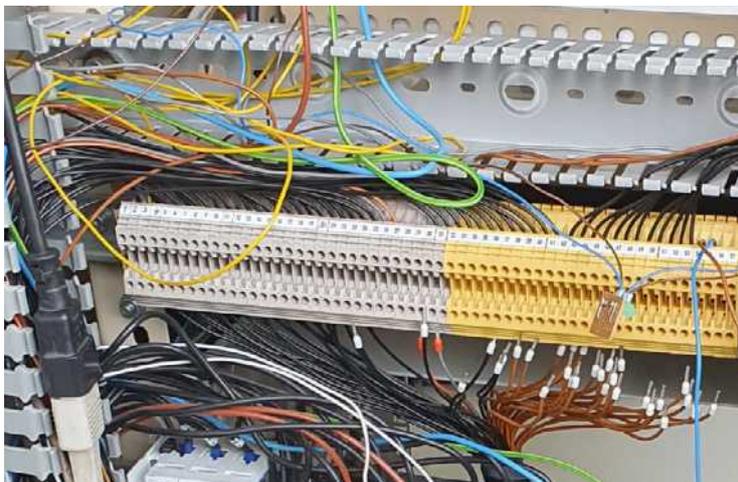


Abbildung 2.2.: Vom HAN-D-Stecker aufgelegte Adern im Schaltschrank der CNC-Verfahrenanlage

Dadurch, dass der Laser schon vor dieser Arbeit betrieben werden konnte, scheinen folgende Verbindungen zwischen CNC-Verfahrenanlage und Laser auszureichen (AS steht folgend für Automation Studio):

Adresse AS	Bezeichnung AS	Klemme Rofin	Bezeichnung Rofin
IF6.ST7.DigitalOutput01	doBeamerOnOff	X434.1	Ext. Gate 24 V oder = Laserstrahl EIN/AUS
IF6.ST7.DigitalOutput02	doShutterOnOff	X410.5	Verschluss AUF/ZU
IF6.ST7.DigitalOutput03	doLasermodeA0	X400.1	Programmanwahl BCD1
IF6.ST7.DigitalOutput04	doLasermodeA1	X400.2	Programmanwahl BCD2
IF6.ST2.DigitalOutput01	diStatusLaserPower[1]	X83.4/16	Hochspannung ist EIN (Schließer)
IF6.ST2.DigitalOutput03	diStatusShutter[0]	X83.6/18	Verschluss ist ZU
IF6.ST2.DigitalOutput04	diStatusShutter[1]	X83.5/17	Verschluss ist AUF

Tabelle 2.1.: Vor dem Umbau mit dem Laser verbundene AS-Variable

Die Klemmen am Laser, die mit Spannung versorgt werden müssen, werden über das Netzteil der CNC-Verfahrenanlage versorgt.

2.1.2. Vorhandene Verkabelung am Laser

Da der Laser bereits bei einer Firma als Bearbeitungswerkzeug für Bleche eingesetzt wurde, ist im Schaltschrank des Lasers ein Beckhoff-Profibus-Buskoppler mit einer Reihe an Aus- und Eingangskarten verbaut. Dieser wurde von einer Siemens S7 SPS angesteuert und diente dazu, mit dem Laser zu kommunizieren. Der Systemintegrator, der den Laser für seinen Einsatzzweck elektrisch verbunden hat, führte alle elektrischen Verbindungen in blau mit Querschnitt $0,75 \text{ mm}^2$ aus. Das violette, stärkere Kabel war die Profibus-Verbindung zur Siemens S7. Der Beckhoff-Buskoppler ist aufgrund einer fehlenden Profibusverbindung außer Betrieb gesetzt und die Kommunikation mit dem Laser erfolgt ausschließlich über Hardwiring.

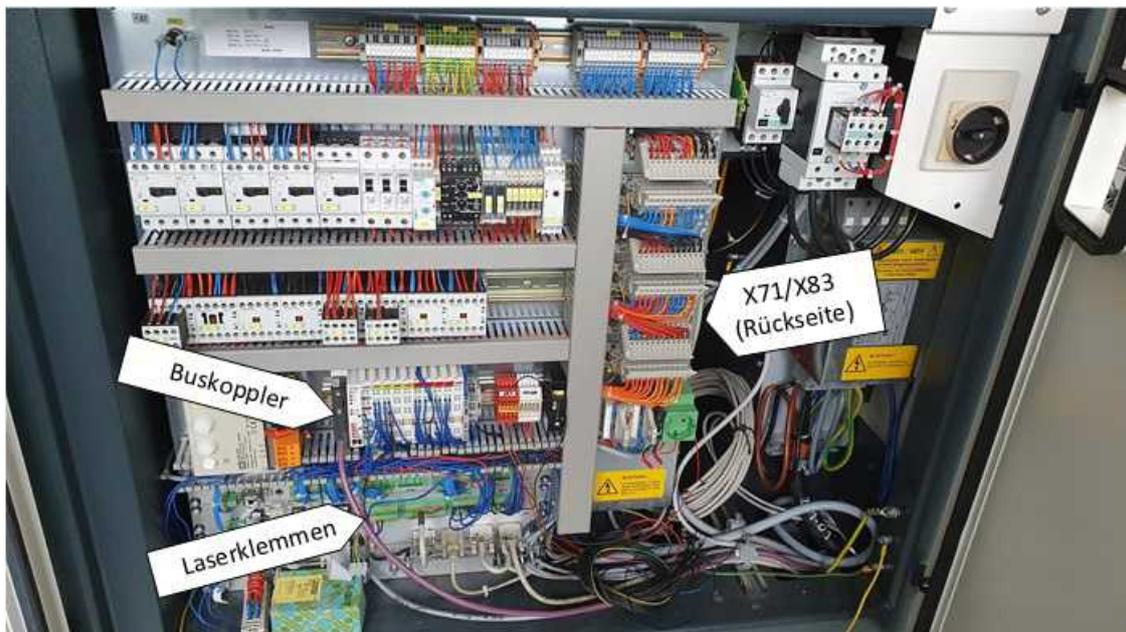


Abbildung 2.3.: Übersicht über die alte Verkabelung des Lasers mit dem Beckhoff-Buskoppler

2.1.3. Vorhandene Verkabelung an der SPS

Im bewegbaren Schaltschrank, in dem sich die SPS der CNC-Verfahrenanlage befindet, sind einige Drahtverbindungen ungesichert und lose. Einige Adern des Kabels, des Handbediengeräts, sind in Blockklemmen angeklemt, die frei hängen. Für einige Kabel, die von unten in den Schaltschrank geführt werden, gibt es keinerlei Zugentlastung. In einer Karte der SPS sind keine Adern angeklemt. Viele der angeklemtten Adern in den SPS-Karten führen zu den Klemmen im oberen Bereich. Diese Verbindungen führen weiter zum HAN-D Stecker und sind dort nicht mehr verbunden (siehe Abb. 2.4).

Der Grund für die teils chaotische Verkabelung sind zahlreiche Änderungen an der Elektrik der Anlage in den letzten Jahren, unter anderem der Ein- und Ausbau einer Distanzregelung des Bearbeitungskopfes.

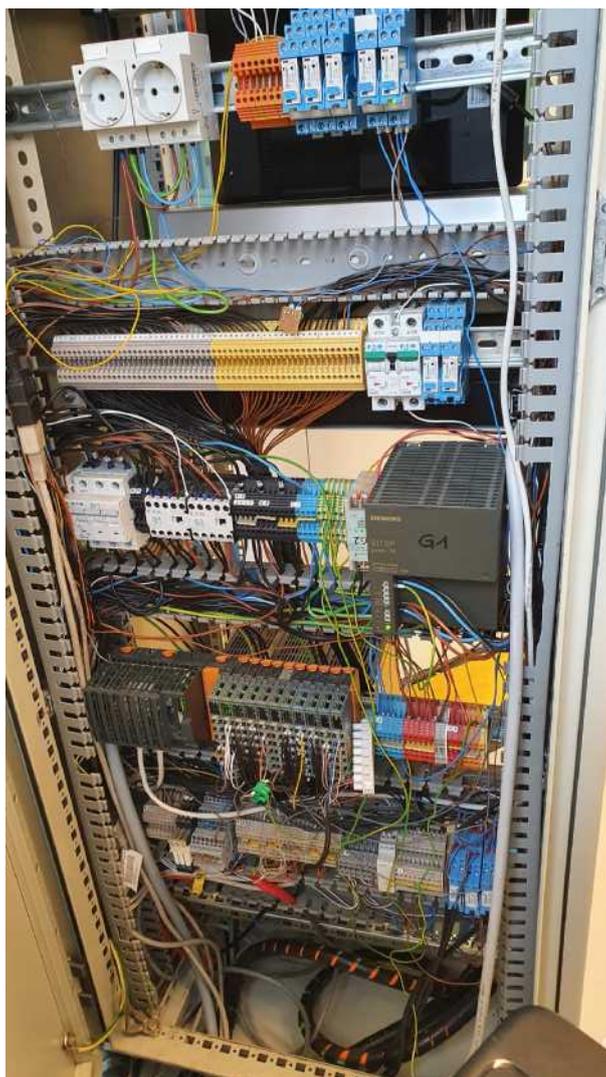


Abbildung 2.4.: Rückseite des beweglichen Schaltschranks der SPS der CNC-Verfahrenanlage

Vorne im beweglichen Schaltschrank sind die Servoverstärker der CNC-Verfahrenanlage eingebaut. Alle Servoverstärker sind in einer linienförmigen Topologie mittels Powerlink mit der SPS und untereinander verbunden. Der Servoverstärker der z-Achse ist der letzte in dieser Linie, dementsprechend ist eine Powerlinkschnittstelle nicht weiter verbunden.

In Abbildung [2.5](#) gut zu erkennen ist außerdem der HAN-D Stecker.



Abbildung 2.5.: Vorderseite des beweglichen Schaltschranks der SPS der CNC-Verfahrenanlage

2.1.4. Softwareausgangszustand der CNC-Verfahrenanlage

Das HMI (Human Machine Interface) der Anlage ist ein großes Touchpanel der Firma ViewSonic (siehe Abb. 2.1 S. 6). Dieses ist verbunden mit einem Windows-PC, auf dem eine VNC-Visualisierung läuft. Außerdem ist der PC mit der SPS verbunden. Mit dem installierten Automation Studio 3.0.90 kann die Software der SPS bearbeitet werden und mittels „Watch“-Modus können Variablenwerte live abgerufen werden.

In der sog. „Logical View“ sind in einer Ordnerstruktur alle Programme, bzw. Softwarebestandteile des Projekts abgelegt. Hier können Änderungen hinsichtlich des Programmablaufs getätigt werden. Im Ordner „MotionInitFiles“ befinden sich die Dateien des CNC-Kernels und der Achsen (siehe Abb. 2.6).

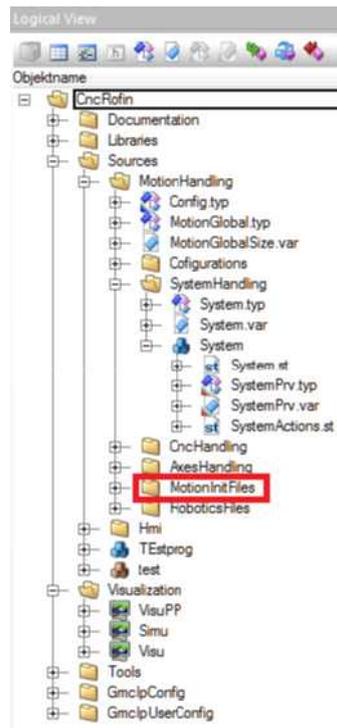


Abbildung 2.6.: B&R, „Logical View“ des AS-Projekts

Das Programm „SystemActions.st“ beinhaltet alle Softwarekomponenten, die über den CNC-Kernel hinaus für die Funktion der Anlage notwendig sind. So z.B. das Laserhandling oder das Gashandling für die Prozessgase (siehe Abb. 2.7).

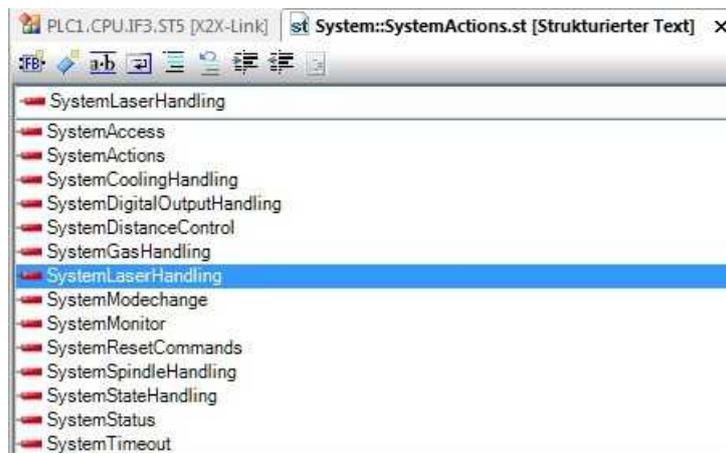


Abbildung 2.7.: B&R, „Actions“ des SW-Bausteins „SystemActions.st“

In der Ansicht „Physical View“ werden die Komponenten der SPS angezeigt. In Abbildung 2.8 wird der Prozessor als oberster Eintrag angeführt. Unter „Steckplatz“ wird die jeweilige Adresse des Moduls angezeigt. So befinden sich etwa am „IF6 (Interface 6)“ alle Karten der SPS. Die Reihenfolge in dieser Baumstruktur gibt die physische Anordnung im Schaltschrank

wieder. So kann bei Änderungen schnell die betreffende Karte gefunden werden. Zu beachten ist, dass in dieser Ansicht nur Karten angezeigt werden, die über die Schnittstelle „IF6“, dem internen X2X-Link, mit dem Prozessor verbunden sind. Karten oder Geräte, die über andere Schnittstellen mit dem Prozessor verbunden sind, werden in anderen Ansichten angezeigt, die mit einem rechten Maustastenklick auf den Prozessor in der „Physical View“ ausgewählt werden können.

Bestellnr.	Steckplatz	Versio	Beschreibung
PLC1			
X20CP1585	PLC1.CPU	1.0	X20 CPU ATOM, 1.0GHz, PC
USB	IF4		
USB	IF5		
	SS1		
	SK		
X20DI9371	PLC1.CPU.IF6.ST1	1.0	12 Digitale Eingaenge 24 VD
X20DI9371	PLC1.CPU.IF6.ST2	1.0	12 Digitale Eingaenge 24 VD
X20DI9371	PLC1.CPU.IF6.ST3	1.0	12 Digitale Eingaenge 24 VD
X20AI2632-1	PLC1.CPU.IF6.ST4	1.0	2 Eingaenge ±11 V / 0 bis 22
X20PS2100	PLC1.CPU.IF6.ST5	1.0	24 VDC Einspeisemodul fuer
X20DO9322	PLC1.CPU.IF6.ST6	1.0	12 Ausgaenge 24 VDC / 0,5
X20DO9322	PLC1.CPU.IF6.ST7	1.0	12 Ausgaenge 24 VDC / 0,5
X20DO9322	PLC1.CPU.IF6.ST8	1.0	12 Ausgaenge 24 VDC / 0,5
X20AO2632	PLC1.CPU.IF6.ST9	1.0	2 Ausgaenge ±10 V / 0 bis 2
X20BT9100	PLC1.CPU.IF6.ST10	1.0	Bussender, Einspeisung 24 V
4XP0000.00-	PLC1.CPU.IF6.ST11	1.0	Dezentrale E/A
4XPENCODE	PLC1.CPU.IF6.ST12	1.0	Encoder
VNC-Viewer-	PLC1.CPU.IF8.ST1	1.0	SXGA Panel (VNC)
	KB1		

Abbildung 2.8.: B&R, „Physical View“ der Ursprungs-SPS-Konfiguration

Die dritte wichtige Ansicht des Automation Studios ist die „Configuration View“ (siehe Abb. 2.9). Hier können Softwarekonfigurationen für unterschiedliche Hardwarekonfigurationen festgelegt werden. Die aktive Konfiguration hat beispielsweise eine „IO-Map-Datei“ die eine Zuordnung zwischen Variablen und physischen Aus- und Eingängen herstellt, sowie ein Visualisierungsobjekt „Visu.vcm“.

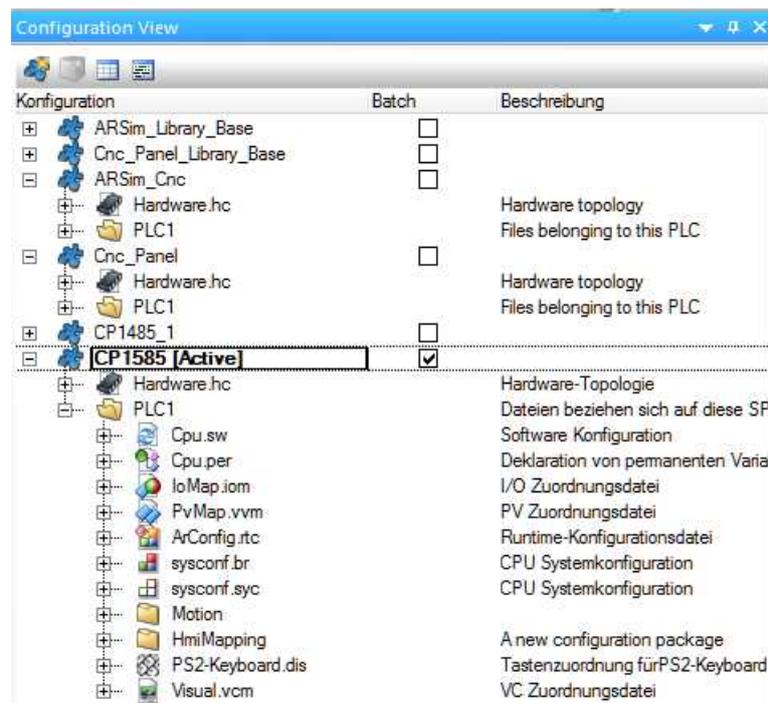


Abbildung 2.9.: B&R, „Configuration View“ der Ursprungs-SPS-Konfiguration

2.2. Neuverkabelung der Steuerungsinstallation am Laser

Um den neuen Laser entsprechend seiner Möglichkeiten betreiben zu können, ist es notwendig, eine Vielzahl von Ein- und Ausgängen des Lasers mit der SPS zu verbinden. Die Verbindung zwischen SPS und Laser über Hardwiring herzustellen ist jedoch nicht die beste Vorgehensweise. Folgende Gründe sprechen gegen diese Lösung:

1. Hardwiring nimmt sehr viel Platz in den Schaltschränken ein.
2. Unübersichtlichkeit. Genaue Kennzeichnung der Adern notwendig → hohes Fehlerpotenzial bei der Verkabelung.
3. Lange Kabellängen beeinflussen die Signalqualität. Das ist vor allem bei den analogen Verbindungen ein großes Problem.

Der verbaute Buskoppler ist von der Firma Beckhoff, die gesamte andere Steuerung (SPS) aber von der Firma B&R. Eine Implementierung des vorhandenen Buskopplers über die Profibus-Schnittstelle des Beckhoff-Buskopplers wäre mit einer entsprechenden Erweiterungskarte der B&R-SPS möglich. Leider gibt es aber keinerlei Software für den Beckhoff-Buskoppler, daher müsste jeder mit dem Buskoppler verbundene Aus- und Eingang neu verlinkt werden. Außerdem müsste die gesamte Profibuskommunikation in der B&R-SPS programmiert werden.

Die einfachste Lösung ist die Entfernung des Beckhoff-Buskopplers und die Neuinstallation eines B&R-Buskopplers, der über den Powerlink-Standard mit der SPS kommuniziert. Vor der Entfernung des Beckhoff-Buskopplers ist die Aufzeichnung aller Verbindungen zum Laser erforderlich, um später zumindest einen Überblick zu haben, welche Schnittstellen von Bedeutung sind.

Anschließend wird der Buskoppler mit verbundenen Ein- und Ausgangskarten, Relais und einigen Klemmen an die DIN-Schiene geklemmt (siehe Abb. 2.10). Alle neu hinzugefügten Installationen im Schaltschrank des Lasers sind in einem eigenen Stromlaufplan dokumentiert (siehe Anhang A.1). Die Klemmen und Bauteile sind gemäß den Bezeichnungen des Stromlaufplans im Schaltschrank gekennzeichnet (siehe Abb. 2.11).

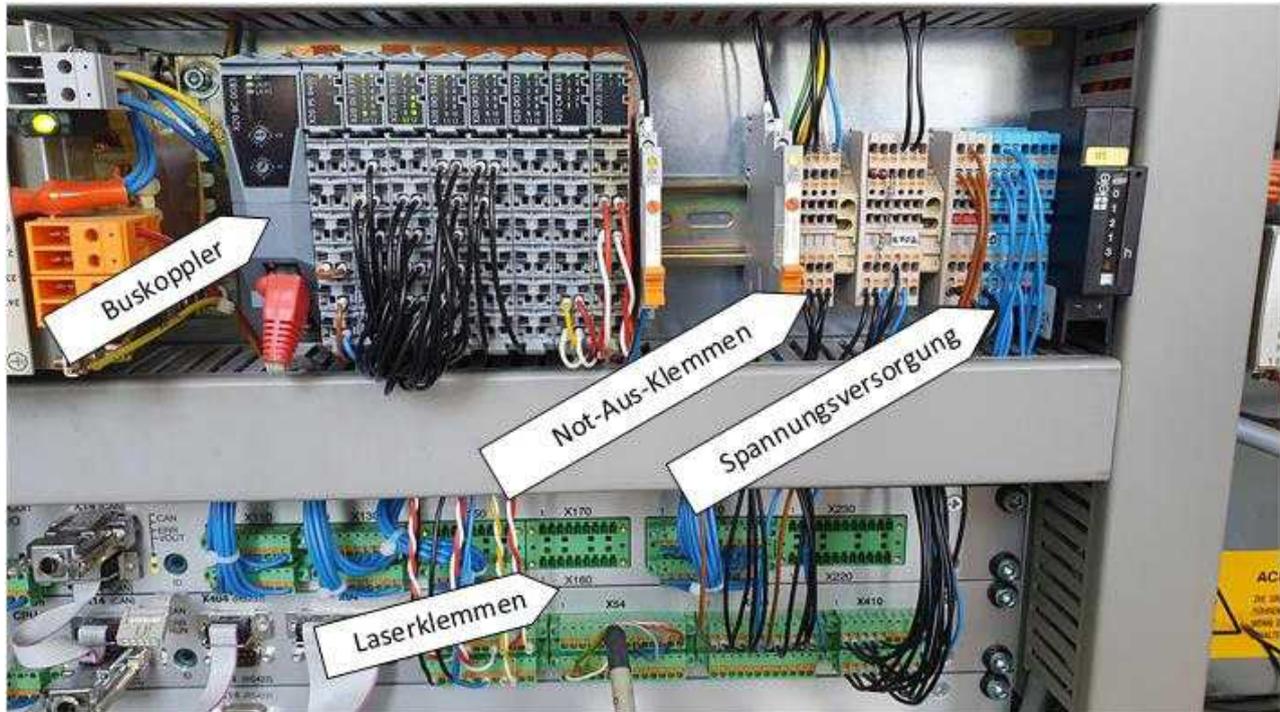


Abbildung 2.10.: Neuinstallation der Schnittstellen zum Laser im Schaltschrank des Lasers



Abbildung 2.11.: Beschriftungen der Klemmen im Schaltschrank des Lasers

2.2.1. Buskoppler

Der Buskoppler im Schaltschrank des Lasers bildet die Verbindung mit der SPS im beweglichen Schaltschrank und ist mit einem Ethernetkabel mit dieser verbunden (mit dem ACOPOS Servoverstärker der z-Achse). Folgende B&R-Komponenten befinden sich im Schaltschrank (v.l.n.r.):

Komponente	Funktion	Herkunft
X20BC0083	Buskoppler	neu
X20PS9400	Spannungsversorgung für die X2X-Link-Karten und die damit verbundenen Komponenten	neu
X20DI9371	Eingangskarte mit 12 24 V Eingängen	neu
X20DI9371	Eingangskarte mit 12 24 V Eingängen	neu
X20DO9322	Ausgangskarte mit 12 24 V Ausgängen	neu
X20DO9322	Ausgangskarte mit 12 24 V Ausgängen	neu
X20DO9322	Ausgangskarte mit 12 24 V Ausgängen	neu
X20CM8281	Mischmodul mit 4 digitalen Eingängen, 2 digitalen Ausgängen, 1 analogen Eingang und 1 analogen Ausgang	neu
X20AO2632	2 analoge Ausgänge $\pm 10\text{ V}$ oder 0 bis 20 mA	alt

Tabelle 2.2.: B&R Geräte im Schaltschrank des Lasers nach dem Umbau

Wichtig für die ordnungsgemäße Funktion des Buskopplers im Powerlink-Netzwerk ist die richtige Einstellung der Knotennummer am Buskoppler. Jede am Gerät eingestellte Knotennummer muss einzigartig im Netzwerk sein. Da der ACOPOS Servoverstärker der z-Achse die Knotennummer 4 hat, wird die Knotennummer des Buskopplers, fortlaufend, auf 5 gesetzt. Bei der Komponente „X20PS9400“, der Spannungsversorgung der nachfolgenden Module, kann gewählt werden, ob Module und Inputs/Outputs getrennt versorgt werden oder nicht. In diesem Fall ist keine getrennte Versorgung notwendig, weshalb eine Drahtbrücke zwischen Klemme 14 und 24 der Komponente „X20PS9400“ installiert ist.

2.2.2. Verdrahtung

Zwischen dem Schaltschrank der SPS und dem Laser laufen drei Kabel. Ein Kabel alleine für das Not-Aus System. Ein Kabel für die Spannungsversorgung des Buskopplers und einiger Klemmen des Lasers, das dritte Kabel ist das Ethernetkabel für die POWERLINK-Verbindung.

Die Verdrahtung der Verbindung zwischen den Modulen des Buskopplers und des Lasers wird mit Draht mit $0,5\text{ mm}^2$ Querschnitt ausgeführt. Drähte mit schwarzer Farbe führen geschaltene, digitale Signale mit 24 V Spannung. Alle analogen Verbindungen, die Ausgänge aus den B&R-Modulen sind, werden mit rotem Draht ausgeführt. Analoge Eingänge mit gelbem Draht. Masseführende Drähte in weißer Farbe.

Spannungsversorgung

Eine Versorgung des Buskopplers, und der extern zu versorgenden Klemmen am Laser, könnte über die Klemmen X71.24 (+24 V) und X71.23 (0 V) des Lasers erreicht werden, jedoch ist hier der entnehmbare Strom auf 500 mA begrenzt. Deshalb wird die Spannungsversorgung des Buskopplers und aller Klemmen des Lasers über die Klemmen X3.5 (+24 V) und X3.11 (0 V) aus dem Schaltschrank der SPS ausgeführt.

Eine Spannungsversorgung mit 230 V ist nicht notwendig.

Laserschnittstellen X71 und X83

Die Schnittstellen X71 „Schnittstellen für externe Steuerung“ sind an der Hinterseite der Tafel im Schaltschrank des Lasers angebracht, auf der Vorderseite sind die Schnittstellen im Laser intern weiter verbunden. Entsprechende Adern müssen am hinteren Harting-Stecker festgeschraubt werden. Die Kontakte sind paarweise ausgeführt mit einem Potential von 230 V. Die meisten X71 Schnittstellen sind Teil der Sicherheitsschaltung des Lasers und steuern den Laser. Ein Öffnen der Verbindung der Kontakte X71.3/15 würde beispielsweise das Öffnen des Verschlusses/Shutter verhindern.

Einige der Funktionen der X71 Schnittstellen können auch über andere Schnittstellen geschaltet werden, die nicht potentialgebunden, bzw. extern mit 24 V versorgt sind. Eine Nutzung der extern mit 24 V versorgten Schnittstellen hat gegenüber den X71 Schnittstellen den Vorteil, dass kein Relais zwischen Buskoppler und Laser notwendig ist und damit weniger Verdrahtungsaufwand entsteht. Die einzigen, in der aktuellen Konfiguration, mit dem Buskoppler verbundenen Schnittstellen sind X71.1/13 (Not-Aus). Beim Öffnen der Verbindung zwischen X71.1 und X71.13 wird das Netz des Lasers ausgeschaltet.

Die Funktion X71.4/16 „Hochspannung Interlock“ und X71.3/15 „Verschluss Interlock“ sind grundsätzlich sinnvoll. Für die Anlage am derzeitigen Stand macht eine Einbindung dieser Interlocks keinen Sinn, denn die Laserstrahlung tritt einzig im Bearbeitungsraum aus und dieser ist mittels Tür-Interlocks ohnehin gesichert. Werden die Türen während der Bearbeitung geöffnet, schließt der Shutter (gesteuert über die Klemme X410.5). Einziges Argument für die doppelte Implementierung wäre eine mögliche geringere Verzögerung des Shutters, diesbezüglich gibt es jedoch keine Information in der Dokumentation des Lasers.

Für die Schnittstelle X71 gibt es einen sog. „Service-Stecker“, der Kontakte brückt (siehe Abb. [2.12](#)).

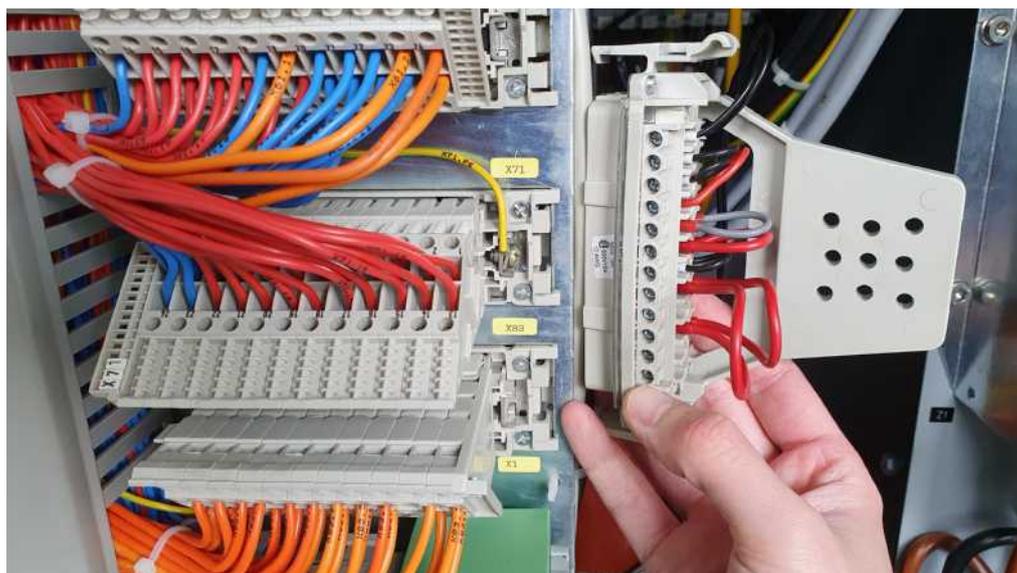


Abbildung 2.12.: Harting-Stecker der Schnittstelle X71 des Lasers

Wie die Schnittstellen X71 sind auch die Schnittstellen X83 über einen Harting-Stecker zu verdrahten (siehe Abb. [2.13](#)). Die X83 Schnittstellen sind potentialfrei und für eine Spannung von 24 V DC ausgelegt. Sie werden vom Laser gesteuert, die Kontakte also vom Laser geschlossen.

X83.1/13 und X83.11/23 sind die beiden Kanäle des Not-Aus-Systems und werden getrennt versorgt. Die anderen Kontakte werden mit 24 V vom Netzteil der SPS über die Klemme „X901_24“ versorgt, wobei immer nur ein Kontakt jedes Paares mit Spannung versorgt wird. Die anderen Kontakte sind mit schwarzen Drähten mit Modulen des Buskopplers verbunden. Über die Schnittstelle X83 wird der SPS beispielsweise mitgeteilt, ob der Shutter offen oder geschlossen ist, oder die Hochspannung aktiv ist.

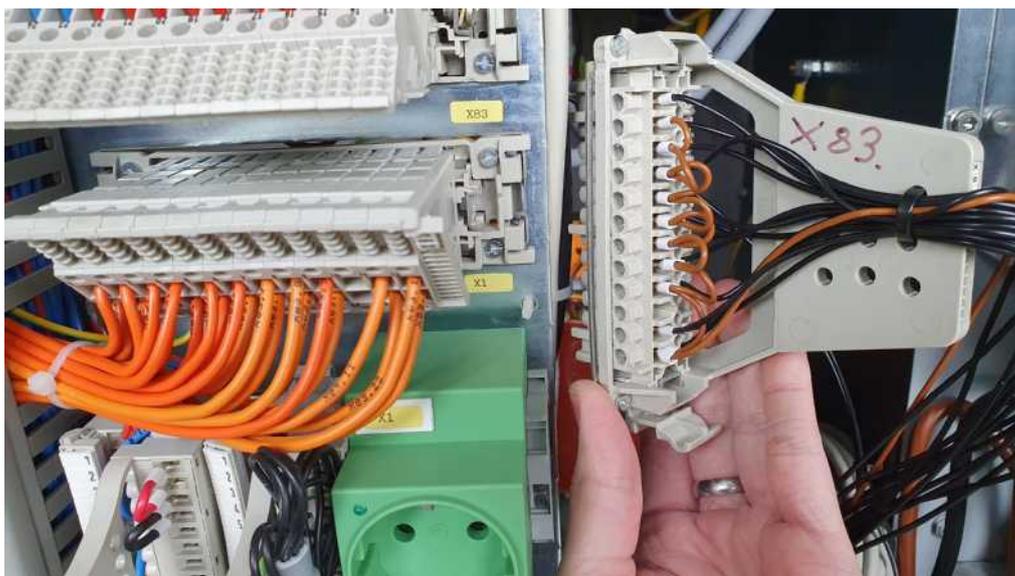


Abbildung 2.13.: Harting-Stecker der Schnittstelle X83 des Lasers

Laserschnittstellen X400 bis X444

Die Laserschnittstellen X400 bis X444 sind im Großen und Ganzen für die Kommunikation mit dem Laser verantwortlich. Alle diese Klemmenblöcke müssen mit externer Masse versorgt werden. Ihre Funktionen (lt. Handbuch des Herstellers) lauten wie folgt:

Bezeichnung	Funktion
X400	Anwahl von Rampen- oder Pulsprogrammen von extern
X410	Externe Zusatzfunktionen
X430	Statusausgänge (24 V DC)
X434	Rampen-/ Pulsgenerator (RPG)
X444	Externe Analogeingänge

Tabelle 2.3.: Schnittstellen des Lasers zur Kommunikation mit externen Quellen

Nicht alle der, über diese Klemmen zur Verfügung gestellten, Funktionen des Lasers sind für den Betrieb notwendig, bzw. sinnvoll. Der Positionierlaser beispielsweise, kann über die Klemme X410.3 ein- und ausgeschaltet werden. Im Sinne der Bedienlogik der Anlage ist es aber sinnvoller die Bedienung des Positionierlasers, mit den anderen Funktionen des Lasers, vom Laserpanel aus zu steuern. Um ein späteres Einbinden aller Informationen so einfach wie möglich zu machen, sind alle möglichen Klemmen des Lasers auch mit Modulen am Buskoppler verbunden.

Die für die Laserprogrammwahl zuständigen Klemmen X400.1 bis X400.9 können laut Handbuch des Herstellers des Lasers in zwei verschiedenen Varianten BCD-codiert sein:

Bezeichnung	Variante a	Variante b
X400.1	BCD 1	BCD 1
X400.2	BCD 2	BCD 2
X400.3	BCD 4	BCD 4
X400.4	BCD 8	BCD 8
X400.5	BCD 16	BCD 10
X400.6	BCD 32	BCD 20
X400.7	nicht in Verwendung	BCD 40

Tabelle 2.4.: Übersicht Klemme X400

Beim eingesetzten Laser sind die Eingänge X400.1 bis X400.6 mit **Variante a** codiert. Der Laser dieser Anlage kann grundsätzlich auch mit einem Rampengenerator ausgestattet werden, dieser ist jedoch nicht vorhanden. Dadurch bleibt der Klemmenblock X420 ohne Funktion.

Die Klemme X434.5 kann zum direkten Pulsen des Lasers mit einer externen Quelle verwendet werden. Die Spannung ist auf +15 V limitiert. Aus diesem Grund wurde zwischen dem Modul des Buskopplers und der Laserschnittstelle ein Spannungsteiler mit zwei Widerständen an der Klemme X902 installiert.

2.3. Neuverkabelung der CNC-Verfahrenlagenschnittstellen

Neben den Umbauten im Schaltschrank des Lasers gibt es auch einige Änderungen im Schaltschrank der SPS.

2.3.1. Wegfall alter Installationen

Vor dem Umbau nahm das Hardwiring der Kommunikation zwischen SPS und Laser sehr viel Platz im Schaltschrank der SPS ein. In Abbildung [2.14](#) erkennt man an der Unterseite der Klemmen die Zuführung der Adern vom Laser. An der Oberseite angeklebte Adern führen zu den Modulen der SPS, bzw. zum Netzteil.

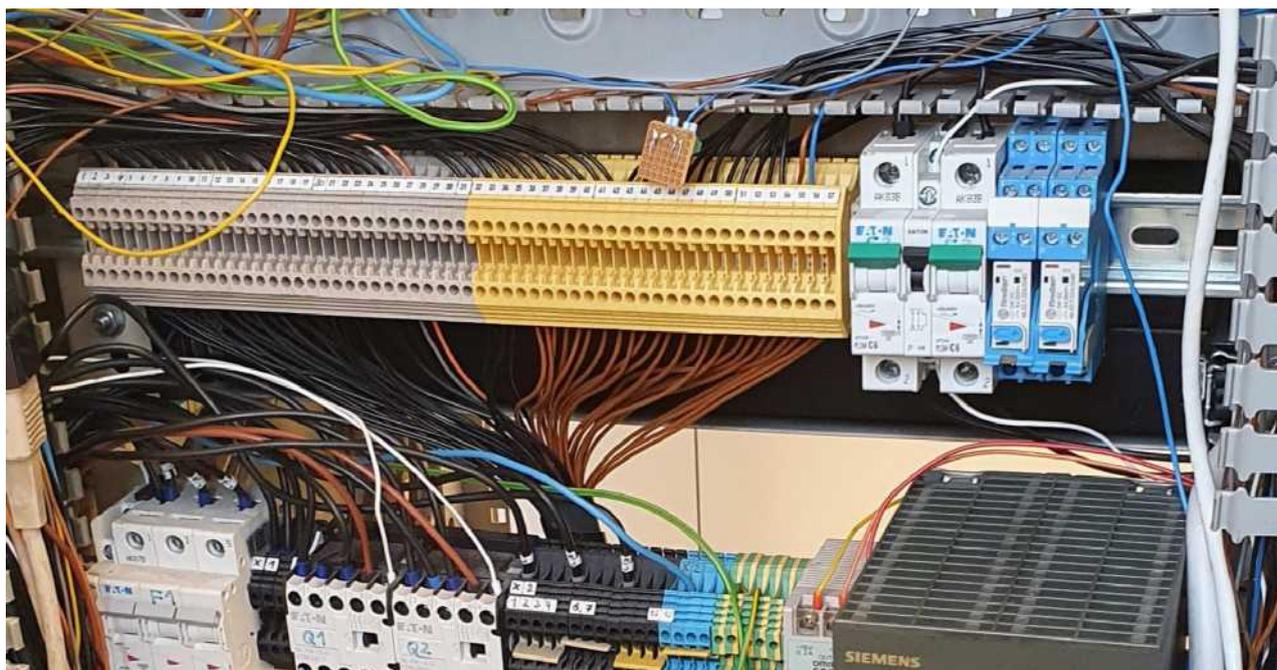


Abbildung 2.14.: Klemmenstock, über den vor dem Umbau Ein- und Ausgänge des Lasers mit der SPS verbunden waren

Nach dem Umbau entfallen diese Klemmen zur Gänze. Zwei Sicherungsautomaten und Relais werden an einem anderen Platz im Schaltschrank untergebracht. Dadurch entsteht Platz für zukünftige Einbauten im Schaltschrank der SPS (siehe Abb. [2.15](#)).



Abbildung 2.15.: Blick in den hinteren, oberen Bereich des Schaltschranks der SPS nach dem Umbau

2.3.2. Anpassung der SPS

Vor dem Umbau war die Verdrahtung der SPS äußerst unübersichtlich (siehe Abb. 2.16). Viele der Adern, die mit den Modulen der SPS verbunden sind, führen zu den Klemmen die den Laser mit der SPS verbinden, sind aber dort nicht mehr weiter verbunden. Diese Adern können entfallen. Die grüne Blockklemme verbindet ein Eingangsmodul mit losen Adern ohne Verbindung. Auch diese Adern können entfallen.

Mit der weißen Blockklemme sind einige Adern des Kabels zum Handbediengerät verbunden. Hier ist das Problem, dass nicht genug Platz neben der SPS ist, um die Adern sauber in Klemmen auf der C-Schiene aufzulegen.

Folgende Module sind vor dem Umbau mit dem Prozessor der SPS verbunden:

Komponente	Funktion
X20DI9371	Eingangskarte mit 12 24 V Eingängen
X20DI9371	Eingangskarte mit 12 24 V Eingängen
X20DI9371	Eingangskarte mit 12 24 V Eingängen
X20AI2632-1	Analoge Eingangskarte mit 2 ± 11 V Eingängen
X20PS2100	24 V DC Einspeisemodul
X20DO9322	Ausgangskarte mit 12 24 V Ausgängen
X20DO9322	Ausgangskarte mit 12 24 V Ausgängen
X20DO9322	Ausgangskarte mit 12 24 V Ausgängen
X20AO2632	2 analoge Ausgänge ± 10 V oder 0 bis 20 mA
BT9100	X2X Link Bussender (ganz rechts zu betreiben)

Tabelle 2.5.: An der SPS angeschlossene Module vor dem Umbau

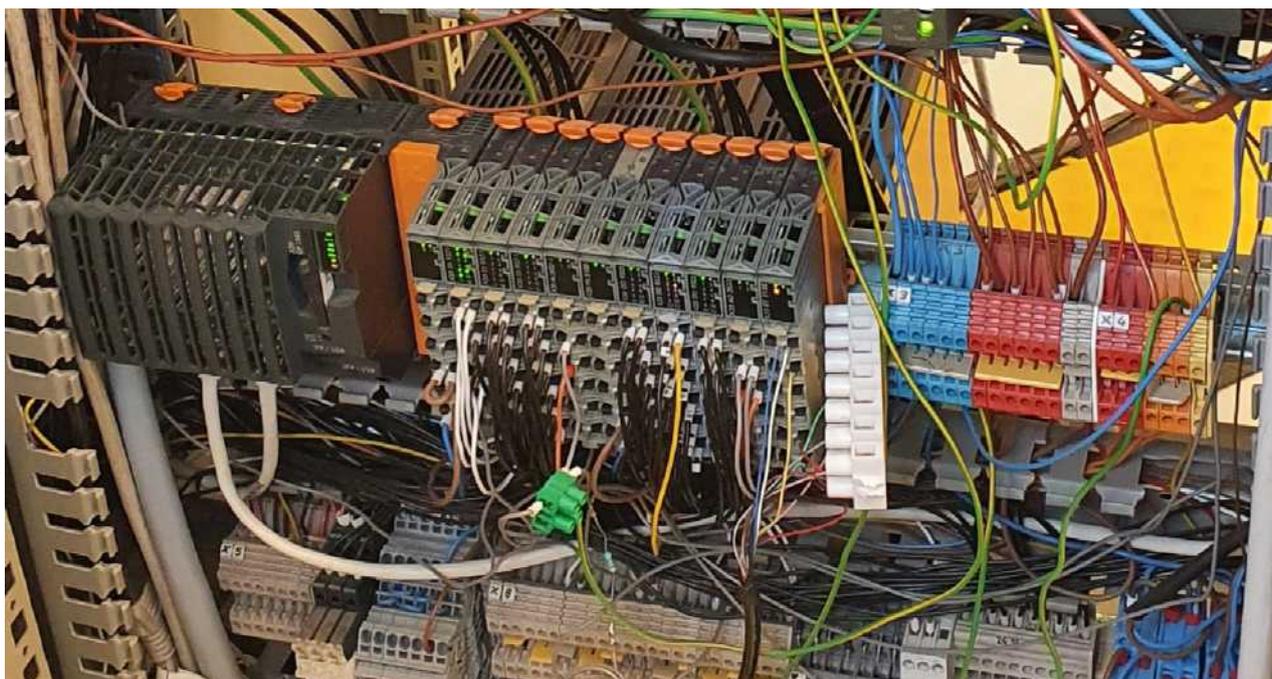


Abbildung 2.16.: Blick auf die SPS vor dem Umbau

Durch den Wegfall einiger Adern können beim Umbau einige Module entfallen. Folgende Module sind nach dem Umbau noch verbaut (siehe Tab. 2.5 und Abb. 2.17):

Komponente	Funktion
X20DI9371	Eingangskarte mit 12 24 V Eingängen
X20DI9371	Eingangskarte mit 12 24 V Eingängen
X20AI2632-1	Analoge Eingangskarte mit 2 ± 11 V Eingängen
X20PS2100	24 V DC Einspeisemodul
X20DO9322	Ausgangskarte mit 12 24 V Ausgängen
X20DO9322	Ausgangskarte mit 12 24 V Ausgängen
X20BT9100	X2X Link Bussender (ganz rechts zu betreiben)

Tabelle 2.6.: An der SPS angeschlossene Module nach dem Umbau

Durch den Wegfall einiger Module wird Platz auf der C-Schiene frei, der dazu verwendet wird, zusätzliche Klemmen für die Neuverkabelung der Schnittstelle zum Handbediengerät zu montieren. Verbesserungen der Rechenleistung der SPS sind nicht zu erwarten, da die Aus- und Eingänge nur örtlich verschoben werden (vom Schaltschrank der SPS in den Schaltschrank des Lasers).



Abbildung 2.17.: Blick auf die SPS nach dem Umbau

Folgende Module werden weder im Schaltschrank der SPS noch im Schaltschrank des Lasers benötigt und dienen fortan als Ersatzteile:

Komponente	Funktion
X20DI9371	Eingangskarte mit 12 24 V Eingängen
X20DO9322	Ausgangskarte mit 12 24 V Ausgängen
X20DO9322	Ausgangskarte mit 12 24 V Ausgängen

Tabelle 2.7.: Ersatzmodule nach dem Umbau

2.3.3. Neuverkabelung der Schnittstelle zum Handbediengerät

Das Kabel des Handbediengeräts war vor dem Umbau im Schaltschrank am Modul „X20BT9100“ angeschlossen. Das Problem dabei war, dass die Kabellänge nicht ausreichte, um das Handbediengerät komfortabel in den Bearbeitungsraum mitzunehmen.

In einem ersten Schritt werden die Adern, die in der weißen Blockklemme angeschlossen waren, auf separate C-Schienen-Klemmen neben den Modulen der SPS angeschlossen. Das wurde möglich, da dort durch den Wegfall einiger Module Platz frei wurde (siehe Abb. 2.18).



Abbildung 2.18.: Blick auf das Modul „X20BT9100“, das für die Kommunikation mit dem Handbediengerät zuständig ist, vor dem Umbau

Der nächste Schritt ist die Verlängerung des Kabels. Dazu wird eine Aufputzdose neben der Türe zum Bearbeitungsraum installiert. In dieser Aufputzdose befinden sich Klemmen, an die auf der einen Seite die Adern des Kabels des Handbediengeräts montiert werden und auf der anderen Seite die Adern der Verlängerung. In Abbildung [2.19](#) sind die Klemmen in der Aufputzdose zu sehen und zwei orange Kabel, die zum neu installierten Not-Aus-Taster führen. Bei der Verbindung der beiden Kabel wird darauf geachtet, dass die Aderfarben möglichst ident sind.



Abbildung 2.19.: Aufputzgehäuse zum Anschluss des Handbediengeräts

Innerhalb des Schaltschranks der SPS sind eine Reihe neuer Klemmen mit der Bezeichnung „X12“ installiert. Auf der Oberseite dieser Klemmen ist das Verlängerungskabel aufgelegt, auf der Unterseite die Verbindung zum Modul „X20BT9100“ (X12.1 - X12.5) sowie zu den Not-Aus-Klemmen (X12.6 - X12.9) mit schwarzem Draht. Der Vorteil dieser Art der Verbindung ist zum einen eine saubere Zugentlastung des Verlängerungskabels (bei der Einführung in den Schaltschrank) und zum anderen eine wesentlich verbesserte Übersichtlichkeit (siehe Abb. [2.20](#)).

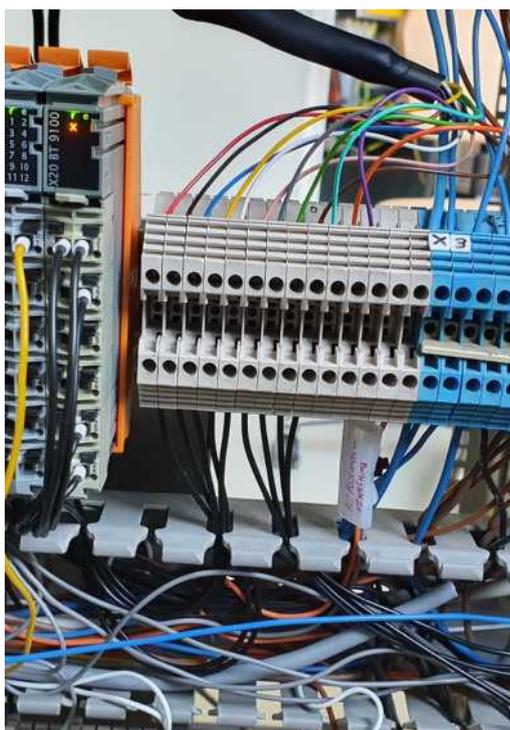


Abbildung 2.20.: Klemme X12 im Schaltschrank der SPS

In Abbildung 2.21 ist das Handbediengerät mit dem nebenliegenden Not-Aus-Taster links neben der Tür zum Bearbeitungsraum zu sehen. Die Position des Handbediengeräts bleibt unverändert, lediglich die Länge des Kabels ist nun optimal, um mit dem Handbediengerät den Bearbeitungsraum zu betreten.



Abbildung 2.21.: Neue Position des Handbediengeräts mit nebenliegendem, neuem Not-Aus-Taster

Folgende elektrische Verbindungen des Handbediengeräts zum Rest der Anlage gibt es nach dem Umbau:

Aderfarbe HB-Gerät/ Aderfarbe Verlängerung	Funktion	Verbunden mit:	Vor dem Umbau verbunden?
Rot/Rot	24 V DC	X12.1/X20BT9100	ja
Schwarz/Schwarz	GND	X12.2/X20BT9100	ja
Blau/Blau	X2X	X12.3/X20BT9100	ja
Gelb/Gelb	X2X (GND)	X12.4/X20BT9100	ja
Weiß/Weiß	X2X/	X12.5/X20BT9100	ja
Rosa/Rosa	Not-Aus NC11	X12.6/X8.6	nein
Grau/Grau	Not-Aus NC12	X12.7/X8.5	nein
Grün/Grün	Not-Aus NC21	X12.8/X8.17	nein
Braun/Braun	Not-Aus NC22	X12.9/X8.18	nein
Rot-Blau/Türkis	seitl. Taster 11	X12.10	nein
Grau-Rosa/Orange	seitl. Taster 12	X12.11	nein
Schirm/Violett	-	X12.12	nein

Tabelle 2.8.: Aderbelegung Handbediengerät

Der Schirm des Kabels zum Handbediengerät war vor dem Umbau nicht auf einer Schirmschiene aufgelegt. Nach einigen Tests mit dem Handbediengerät ist klar, dass der Schirm auch mit einer Verlängerung des Kabels nicht notwendig ist. Der Schirm könnte aber nachträglich zumindest einseitig im Schaltschrank der SPS geerdet werden, um eventuell auftretende Störungen des X2X-Link Signals zu vermeiden bzw. abzuschwächen.

2.4. Not-Aus System

Ein funktionierendes Not-Aus-System ist essentiell für die Sicherheit der Anlage. Auch wenn der Laser in Kombination mit der CNC-Verfahrenanlage ein Laboraufbau ist und ausschließlich von speziell geschultem Personal bedient wird, kann eine Fehlbedienung oder Fehlfunktion nicht ausgeschlossen werden.

2.4.1. Ausgangszustand

Auf der Klemme X8 im Schaltschrank der SPS sind alle Interlocks und Not-Aus-Taster aufgelegt, wobei es freie Plätze gibt, die über Drahtbrücken verbunden sind. X8.1-12 sind Klemmen für den ersten Kanal der Interlocks und der Not-Aus-Taster. X8.13-24 sind Klemmen für den zweiten Kanal. Auf der Oberseite der Klemmen werden diese mit Spannung versorgt (X8.1 und X8.13), sowie der Zustand der Interlocks und der verbundenen Not-Aus-Taster aufgenommen (siehe Abb. [2.22](#)).

Durch Testen ist außerdem aufgefallen, dass der Not-Aus-Kreis des Lasers nicht mit dem Not-Aus-Kreis der SPS verbunden ist. Wird ein Not-Aus des Lasers betätigt, schließt dieser den Shutter und schaltet die Hochspannung sowie das Netz ab. Die SPS bleibt davon unbeeinflusst. Gleichermäßen bleibt der Laser unbeeinflusst von der Betätigung der Not-Aus-Taster der SPS. Ein Not-Aus-Taster der SPS hängt lose am Schaltschrank herab, dieser scheint vom alten Anlagenaufbau zu stammen.

Ein weiterer Not-Aus-Taster befindet sich am Handbediengerät. Dieser ist weder mit der SPS noch mit dem Laser verbunden.

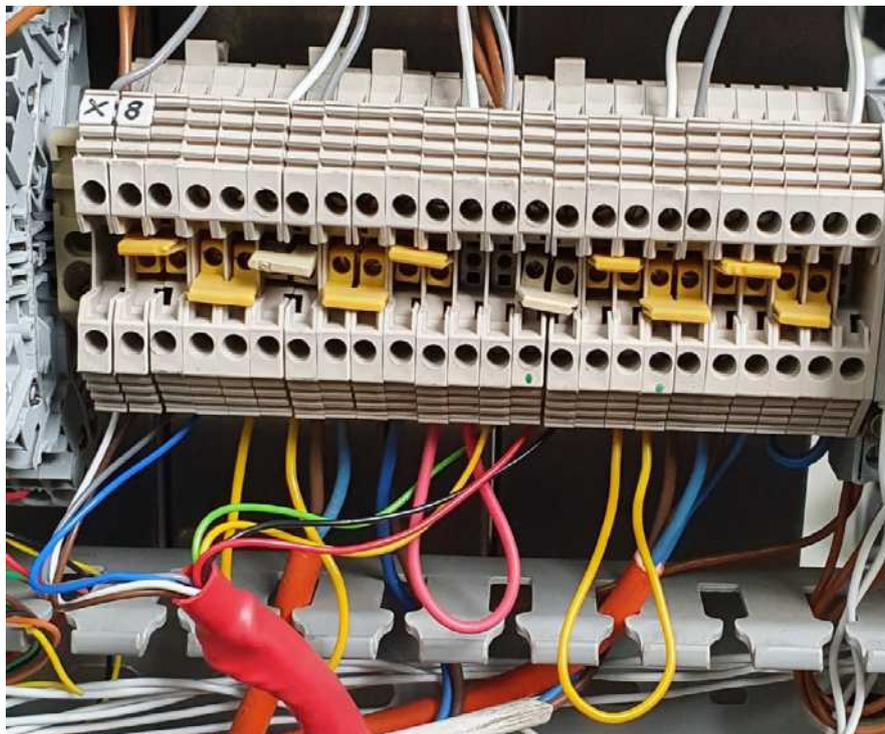


Abbildung 2.22.: Klemme X8 im Schaltschrank der SPS vor dem Umbau

2.4.2. Anpassungen des Not-Aus Systems

Im Zuge des Umbaus der Anlage werden alle verfügbaren Not-Aus-Taster mit SPS und Laser verbunden. In Abbildung [2.23](#) sieht man, dass nun alle X8-Klemmen belegt sind. Hier ist nun der zweikreisige Not-Aus-Taster des Handbediengeräts angeklemmt. Der Laser ist ebenfalls zweikreisig angeklemmt. Die Not-Aus Kommunikation mit dem Laser erfolgt über ein eigenes, sechsadriges Kabel. Sollte der Not-Aus des Lasers auslösen, wird der Stromkreis zwischen X83.1 und X83.13, sowie zwischen X83.11 und X83.23 unterbrochen. Vier Adern davon führen die Not-Aus-Signale vom Laser, von X83.1/13 und X83.11/23, zur Klemme X8 im Schaltschrank der SPS.

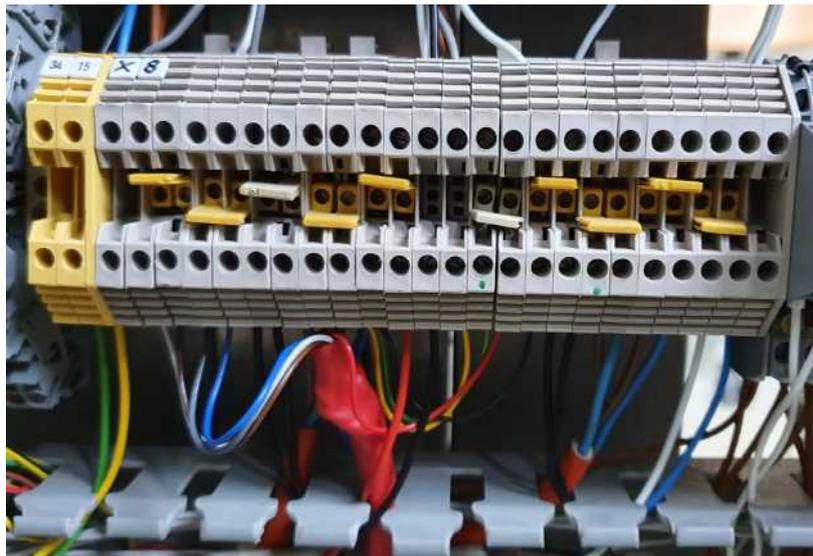


Abbildung 2.23.: Klemmen X13 und X8 im Schaltschrank der SPS nach dem Umbau

Sollten andere Not-Aus-Geräte auslösen, wird der Stromkreis, der über die Klemme X8 geht, an einer Stelle unterbrochen. Damit der Laser dieses Auslösen des Not-Aus registriert, geht eine Ader von der Klemme X8 zur Klemme X13. An der Klemme X13 sind die beiden anderen Adern des Kabels angeschlossen, das zum Laser zur Not-Aus Kommunikation geht. Bei Unterbrechung des Stromkreises fällt die Spannung an Klemme X13 ab und das Relais 13K1 öffnet die Verbindung zwischen X71.1 und X71.13.

Betätigt man nun einen, egal welchen, Not-Aus-Taster, schaltet der Laser das Netz ab und die Servoverstärker der CNC-Verfahrenanlage betätigen die Bremsen der Achsen. Es geht somit keine Gefahr mehr von der Anlage aus.

2.5. Bedienung am Laserpanel

Alle 64 Programme des Lasers können am Laserpanel mit einem Druck auf „F5“ eingesehen werden. In Abbildung [2.24](#) ist Programm 10 markiert.

„L-MAX“ gibt den Faktor an, mit dem die Leistung des Lasers multipliziert wird. Hier kann der Leistungswert schnell skaliert werden.

„L-SK“ gibt die Quelle der Leistungseinstellung an. In diesem Fall ist die Quelle der Leistungseinstellung der erste analoge Eingang des Lasers („A1“). Es ist wichtig, dass hier „A1“ ausgewählt wird, da dieser Eingang des Lasers mit dem Parameter „MW1“ des CNC-Programms verknüpft ist.

Die Frequenz der Laserpulse ist bei Programm 10 mit 1000 Hz eingestellt.

Das Tastverhältnis ist im dargestellten Fall 100 %. Jedoch muss man zusätzlich auch die Spalte „P-ART“ beachten:

„TASTV.“	„P-ART“	<A2>	resultierendes Tastverhältnis
100 %	0:P Fix	23 %	100 %
100 %	2:D(A2)	23 %	100 % · 23 %

Tabelle 2.9.: Übersicht über das resultierende Tastverhältnis

Die Spalte „H-ZEIT“ lässt sich nicht beeinflussen, hier gibt das Laserpanel den berechneten Wert der Haltezeit, also der Pulsdauer aus. Da im gezeigten Fall die Pulsdauer vom analogen Eingang 2 des Lasers abhängt, wird „AN2+“ angezeigt.

PULS PARAMETER							
Nr.	L-MAX	L-SK.	FREQ.	TASTV.	P-ART	BURST	H-ZEIT
0	100.0%	0:Fix	5000Hz	100.0%	0:P Fix	0ms	0.200ms
1	100.0%	0:Fix	5000Hz	100.0%	0:P Fix	0ms	0.200ms
2	2.0%	0:Fix	1000Hz	50.0%	0:P Fix	0ms	0.500ms
3	100.0%	0:Fix	5000Hz	100.0%	0:P Fix	0ms	0.200ms
4	10.0%	0:Fix	5000Hz	100.0%	0:P Fix	0ms	0.200ms
5	0.0%	0:Fix	0Hz	0.0%	0:P Fix	0ms	0.000ms
6	0.0%	0:Fix	0Hz	0.0%	0:P Fix	0ms	0.000ms
7	100.0%	0:Fix	5000Hz	100.0%	0:P Fix	0ms	0.200ms
8	2.0%	0:Fix	5000Hz	100.0%	0:P Fix	200ms	0.200ms
9	0.0%	0:Fix	5000Hz	100.0%	0:P Fix	0ms	0.200ms
10	100.0%	1:A1	1000Hz	100.0%	2:D(A2)	0ms	AN2+
11	1.0%	0:Fix	5000Hz	100.0%	0:P Fix	242ms	0.200ms
12	0.0%	0:Fix	0Hz	0.0%	0:P Fix	0ms	0.000ms
13	0.0%	0:Fix	0Hz	0.0%	0:P Fix	0ms	0.000ms
14	100.0%	1:A1	0Hz	0.0%	19:P Ext	0ms	EXT.
15	0.0%	0:Fix	0Hz	0.0%	0:P Fix	0ms	0.000ms

LASER ÄNDERN SEITE - SEITE +

Abbildung 2.24.: Pulsprogrammanwahl-Ansicht des Laserbedienpanels

Wenn das Laserprogramm aus dem CNC-Programm heraus ausgewählt werden soll, ist es wichtig, dass der in Abbildung [2.25](#) rot markierte Schüsselschalter in der Position „Automatik“ steht.



Abbildung 2.25.: Ansicht des Laserpanels mit rot markiertem „Schlüsselschalter“

2.6. Softwareanpassungen

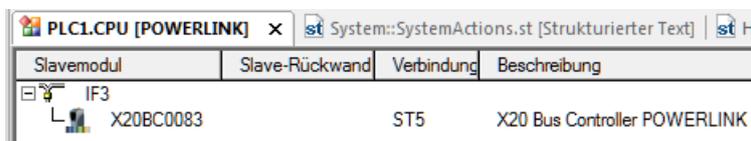
Neben dem Einbau der neuen Hardware sind auch Softwareanpassungen notwendig. Einerseits, da sich die Hardwarekonfiguration geändert hat und andererseits, da neue Funktionen implementiert werden. Alte Funktionen der Anlage, die nicht mehr aktiv sind, werden aus der Software entfernt oder geändert. Ein Ziel dabei ist aber, Funktionen wie eine Distanzregelung des Bearbeitungskopfes, zu gegebenem Zeitpunkt, weiterhin leicht implementierbar zu machen.

Ziel ist die Steuerung, aller mit der Bearbeitung zusammenhängenden Funktionen des Lasers, aus dem CNC-Programm heraus.

2.6.1. Neue Hardwarekonfiguration

Die Karte „X20AO2632“, die für die Einbindung des analogen Sensors zur Abstandsregelung zuständig war, kann aus dem Hardwarebaum der SPS gelöscht werden. Sie wird für die Kommunikation mit dem Laser an anderer Stelle benötigt. Im nächsten Schritt wird der im Schaltschrank des Lasers eingebaute B&R Buskoppler in das AS-Projekt eingebunden. Dazu wird in der „Physical View“ mit Klick auf die rechte Maustaste der Punkt „Öffne POWERLINK“ ausgewählt. Nun öffnet sich ein neues Fenster. In diesem Fenster erkennt man, dass die POWERLINK-Schnittstelle der SPS, bzw. des Prozessors den Namen „IF3“ hat. An dieser Stelle kann nun das Modul „X20BC0083“ eingefügt werden. Sieht man in den Schaltschrank des Lasers, erkennt man, dass es das erste, über POWERLINK mit der SPS verbundene,

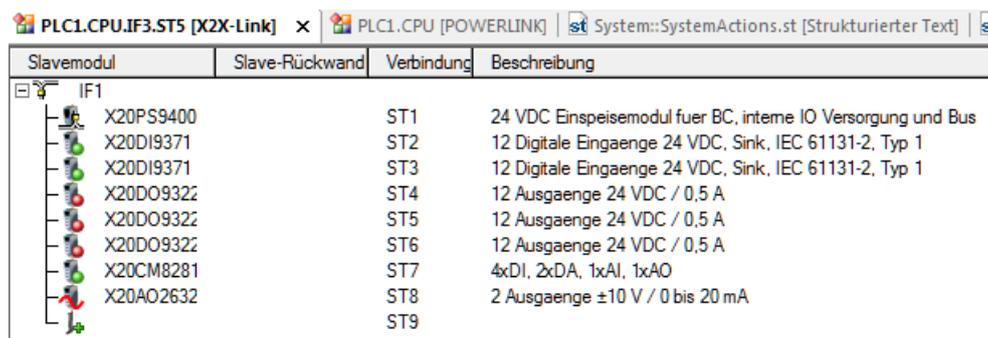
Modul ist. Die ACOPOS-Servoverstärker werden in dieser Ansicht nicht gezeigt, da sie im Automation Studio eigens behandelt werden. Der Buskoppler bekommt den Steckplatz „ST5“, da am Buskoppler selbst die Knotennummer fünf eingestellt wurde. In Abbildung 2.26 ist die fertig konfigurierte Schnittstelle „IF3“ zu sehen.



Slavemodul	Slave-Rückwand	Verbindung	Beschreibung
IF3	X20BC0083	ST5	X20 Bus Controller POWERLINK

Abbildung 2.26.: B&R, Ansicht des über POWERLINK mit der SPS verbundenen Gerätes (außer Motion)

Nun erscheint das Gerät „X20BC0083“ auch im Hardwarebaum der SPS mit der Adresse „PLC1.CPU.IF3.ST5“. Mit Klick auf die rechte Maustaste auf den neu hinzugefügten Buskoppler und Klick auf „Öffne X2X-Link“ öffnet sich die Ansicht der Karten, die über den X2X-Link mit dem Buskoppler im Schaltschrank des Lasers verbunden sind. Nun können alle eingebauten Karten in richtiger Reihenfolge hinzugefügt werden. Die zuvor entfernte „X20AO2632“-Karte wird ebenfalls eingefügt. Ist das abgeschlossen, sieht die Schnittstellenkonfiguration der Schnittstelle „IF1“ des Buskopplers, wie in Abbildung 2.27 gezeigt, aus.



Slavemodul	Slave-Rückwand	Verbindung	Beschreibung
IF1	X20PS9400	ST1	24 VDC Einspeisemodul fuer BC, interne IO Versorgung und Bus
	X20DI9371	ST2	12 Digitale Eingänge 24 VDC, Sink, IEC 61131-2, Typ 1
	X20DI9371	ST3	12 Digitale Eingänge 24 VDC, Sink, IEC 61131-2, Typ 1
	X20DO9322	ST4	12 Ausgänge 24 VDC / 0,5 A
	X20DO9322	ST5	12 Ausgänge 24 VDC / 0,5 A
	X20DO9322	ST6	12 Ausgänge 24 VDC / 0,5 A
	X20CM8281	ST7	4xDI, 2xDA, 1xAI, 1xAO
	X20AO2632	ST8	2 Ausgänge ±10 V / 0 bis 20 mA
		ST9	

Abbildung 2.27.: B&R, Ansicht aller über X2X-Link mit dem Buskoppler verbundenen Karten

Sieht man sich nun den Hardwarebaum der SPS an, sind alle Karten gleichrangig in das Automation Studio Projekt eingebunden. Es macht dabei keinen Unterschied mit welchem Buskoppler die Karten verbunden sind. Sämtliche über X2X-Link verbundenen Karten werden im AS gleichwertig angezeigt. Einzig die längere Adresse all jener Karten, die im Schaltschrank des Lasers untergebracht sind, lassen auf den entfernten, physischen Platz schließen (siehe Abb. 2.28). Beim „Mapping“ der Variablen mit den Aus- und Eingängen in der „IO-Map-Datei“ muss die Hardwareadresse beachtet werden.

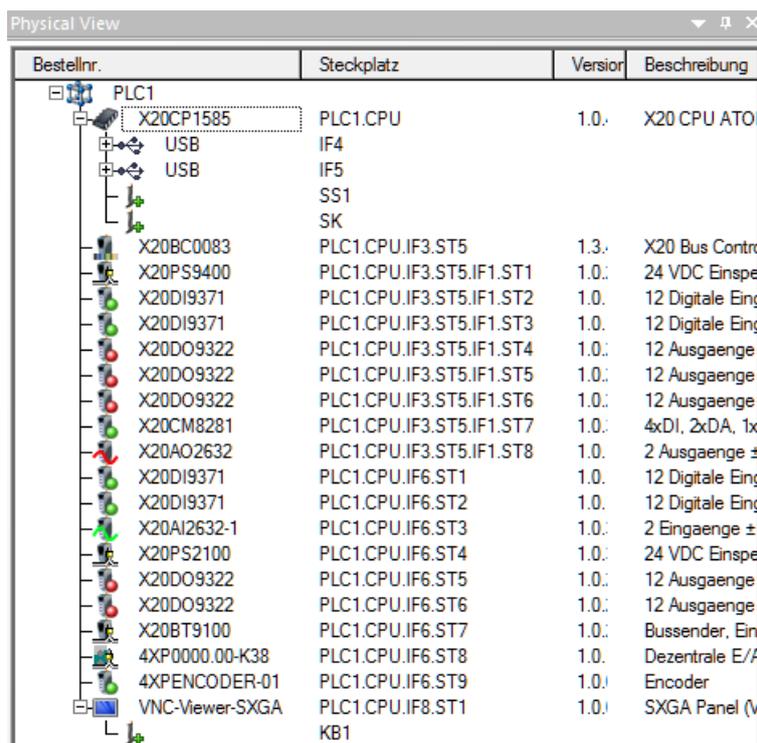


Abbildung 2.28.: B&R, Hardwarebaum der SPS nach der Neukonfiguration

2.6.2. M-Funktionen und M-Parameter

Um das Ziel der möglichst einfachen Steuerung des Lasers aus dem CNC-Programm heraus zu erreichen, bieten sich sog. Maschinen-Funktionen, oder kurz: M-Funktionen an. Diese M-Funktionen wurden in der alten Anlagenkonfiguration bereits verwendet um die Hochspannung oder den Shutter zu schalten. Der CNC-Kernel der B&R Steuerung bietet aber auch noch andere Möglichkeiten um Informationen aus dem CNC-Programm (G-Code) in die SPS zu transferieren, so z.B. die M-Parameter.

M-Funktionen

M-Funktionen dienen dazu, an definierten Stellen im CNC-Programm Bits zu setzen, um Zusatzfunktionen aufzurufen. Man unterscheidet grundsätzlich synchronisierte und nicht synchronisierte M-Funktionen. Bei synchronisierten M-Funktionen hält der Interpreter an der Stelle des Aufrufs der M-Funktion an, bis das verbundene Bit von der SPS auf null gesetzt wurde. Bei unsynchronisierten M-Funktionen hält der Interpreter nicht an, sondern arbeitet den Maschinencode weiter ab.

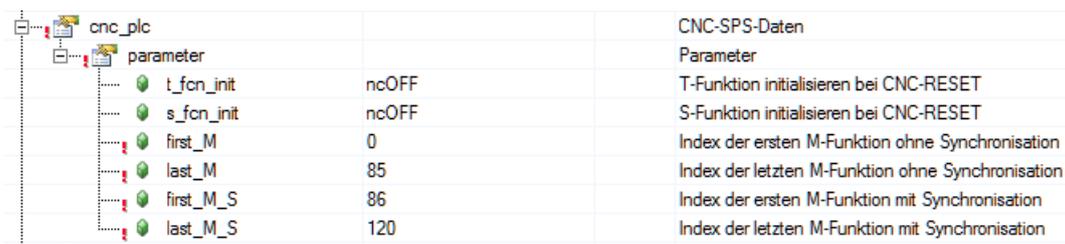
Für die Erweiterung der Kommunikation zwischen SPS und Laser können sechs Zuordnungen von M-Funktionen entfallen. Das betrifft folgende M-Funktionen:

- M45: Lasermode 1 ein
- M46: Lasermode 1 aus

- M47: Lasermode 2 ein
- M48: Lasermode 2 aus
- M49: Reststrom/Rampe ein
- M50: Reststrom/Rampe aus

Die M-Funktionen M45 - M48 werden durch einen M-Parameter ersetzt. M49 - M50 entfallen, da der neue Laser keine Laserleistungsrampen unterstützt.

Wichtig zu wissen ist, dass der Steuerung mitgeteilt werden muss, welcher Bereich von M-Funktionen als synchronisierter und welcher als unsynchronisierter betrieben werden soll. Der Parameter „first_M_S“ in Abbildung 2.29 steht dabei für die erste synchronisierte M-Funktion.



cnc_plc		CNC-SPS-Daten
parameter		Parameter
t_fcn_init	ncOFF	T-Funktion initialisieren bei CNC-RESET
s_fcn_init	ncOFF	S-Funktion initialisieren bei CNC-RESET
first_M	0	Index der ersten M-Funktion ohne Synchronisation
last_M	85	Index der letzten M-Funktion ohne Synchronisation
first_M_S	86	Index der ersten M-Funktion mit Synchronisation
last_M_S	120	Index der letzten M-Funktion mit Synchronisation

Abbildung 2.29.: B&R, Initialisierungsdatei des CNC-Kernels der SPS, Definition der Bereiche für synchronisierte und unsynchronisierte M-Funktionen

Um mit der SPS Zugriff auf die M-Parameter zu erhalten, muss die Variable „pCncMFunction“ an einem bestimmten Bereich angeschlossen werden (siehe Listing 2.1).

```
1 pCncMFunction ACCESS
  pCnc[TempIndex].Output.Monitor.Parameter.MFunctionAccessAddress;
```

Listing 2.1: Anschluss der Variable „pCncMFunction“ im Programm „SystemActions.st“

M-Parameter

M-Parameter können im Gegensatz zu M-Funktionen auch ganze Zahlen größer als eins, Dezimalzahlen und arithmetische Ausdrücke an die SPS übergeben. Dabei können sie auch über das SPS-Programm geändert werden.

Für die Neuprogrammierung der Kommunikation mit dem Laser werden M-Parameter für die Einstellung des Laserprogramms, die Leistungseinstellung und die Einstellung des Tastverhältnisses genutzt.

Um auf M-Parameter mit der SPS zugreifen zu können, muss, gleich wie bei den M-Funktionen, die Variable „pCncMParameter“ an einen bestimmten Bereich angeschlossen werden (siehe Listing 2.2).

```
2 pCncMParameter ACCESS
  pCnc[TempIndex].Output.Monitor.MParameterAccessAddress;
```

Listing 2.2: Anschluss der Variable „pCncMParameter“ im Programm „SystemActions.st“

Da in der alten Softwarekonfiguration keine M-Parameter verwendet wurden, muss die Variable „pCncMParameter“ in der Datei „SystemPrv.var“ mit dem Typ „ARNCOM_PAR_typ“ definiert werden (siehe Abb. 2.30).

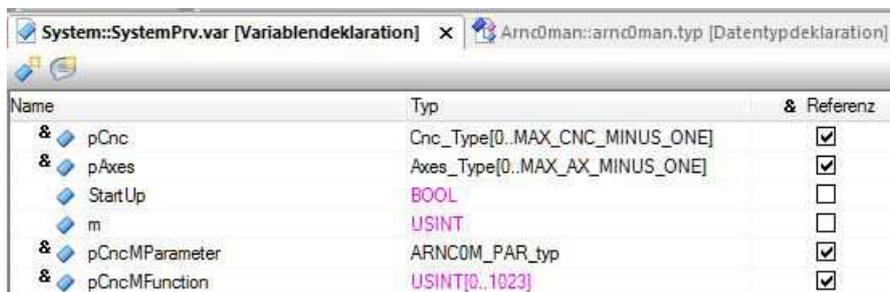


Abbildung 2.30.: B&R, Definition der Adressvariablen für M-Funktionen und M-Parameter

Möchte man einen M-Parameter im CNC-Programm schreiben, muss folgende Syntax beachtet werden (vgl. 1):

$$M<Datentyp><Index>=<Wert>$$

Wobei man folgende Datentypen verwenden kann:

- W ... Word-Parameter (Datentyp INT)
- L ... Long-Parameter (Datentyp DINT)
- F ... Float-Parameter (Datentyp REAL)

Für „Index“ können ganze Zahlen zwischen 0 und 99 eingesetzt werden.

2.6.3. Einstellung des Laserprogramms

Die Festlegung des Laserprogramms aus dem SPS-Programm heraus, erfolgte beim Vorgänger-Laser (alte Konfiguration) über zwei Bits, mit denen folgende Modi gewählt werden konnten:

Modus alt	Bit 1	Bit 0	M-Befehle
Dauerstrich CW	1	0	M45 M48
Normalpuls	1	1	M45 M47
Superpuls	0	1	M46 M47
Hypersuperpuls	0	0	M46 M48

Tabelle 2.10.: Lasermodi des alten Lasers

Beim neuen Laser können 64 Programme über das Laserpanel, oder über digitale Eingänge am Laser, gewählt werden. Grundsätzlich wäre es möglich die notwendigen Bits über M-Funktionen zu steuern. Das wäre aber sehr unübersichtlich und würde die Belegung von insgesamt 12 M-Funktionen voraussetzen (6 Bits, je zwei M-Funktionen zum An- und Abwählen

je Bit).

Um die Bedienung des Lasers für den Bediener, aus dem CNC-Programm heraus, möglichst einfach zu machen, bietet sich ein M-Parameter an, auf den das gewünschte Programm als ganze Zahl geschrieben wird. Der dem gewählten Laserprogramm entsprechende Parameter heißt „pCncMParameter.MW[4]“. Das Laserprogramm wird folgendermaßen im CNC-Programm ausgewählt:

MW4=23 für Laserprogramm 23

Im SPS-Programm muss dann die „Programmzahl“ in Binärcode umgerechnet werden. Anschließend können die entsprechenden Ausgänge der SPS geschaltet werden (siehe Listing 2.3). Mit Abfragen können unplausible Programmzahlen abgefangen werden. Wird ein Wert kleiner Null in den „pCncMParameter.MW[4]“ geschrieben, so wird dieser auf Null gesetzt, wird ein Wert größer 63 in den „pCncMParameter.MW[4]“ geschrieben, wird dieser auf 63 gesetzt. Für alle Werte zwischen Null und 63 wird die Zahl mittels Modulo-Rechnung in Binär umgewandelt. Die entsprechenden Ergebnisse werden schließlich in die Bool-Variablen „doLasermodeA0-A5“ geschrieben.

```

2 // Laserprogramhandling
  IF (pCncMParameter.MW[4] < 0) THEN //Programmnumber <0 does not make sense
    pCncMParameter.MW[4] := 0;
4  ELSIF (pCncMParameter.MW[4] = 0) THEN //Programmnumber = 0 —> set every do to 0
    doLasermodeA0:=0;
6    doLasermodeA1:=0;
    doLasermodeA2:=0;
8    doLasermodeA3:=0;
    doLasermodeA4:=0;
10   doLasermodeA5:=0;
    //dez in bin calculation
12  ELSIF (pCncMParameter.MW[4] > 0) AND (pCncMParameter.MW[4] <= 63) THEN
    dez:=pCncMParameter.MW[4];
14  p:=0;
    WHILE(( dez>0) OR (p<=5)) DO
16    index [p] := REAL_TO_BOOL(fmod( dez ,2));
    dez := dez/2;
18    p := p+1;
    END WHILE
20  doLasermodeA0:=index [0];
    doLasermodeA1:=index [1];
22  doLasermodeA2:=index [2];
    doLasermodeA3:=index [3];
24  doLasermodeA4:=index [4];
    doLasermodeA5:=index [5];
26  ELSIF (pCncMParameter.MW[4] > 63) THEN //Programmnumber >63 does not make sense
    pCncMParameter.MW[4] := 63;
28  END_IF

```

Listing 2.3: Teil der für das Laserprogramm verantwortlichen „SystemLaserHandling“ Action des Programms „SystemActions.st“

2.6.4. Einstellung der Leistung

Die Einstellung der Leistung erfolgte vor dem Umbau immer über einen fix eingestellten Wert, je Laserprogramm, vom Laserpanel aus. Dadurch war es nicht möglich die Leistung des Lasers innerhalb des CNC-Programms zu verändern.

Mit der neuen Softwarekonfiguration ist es möglich die Leistung des Lasers direkt aus dem CNC-Programm heraus zu steuern. Dafür wird im CNC-Programm ein M-Parameter „MW1“ folgendermaßen gesetzt:

MW1=1000 für 1000 W Leistung

Folgender Code wurde für die Umsetzung des M-Parameter „MW1“ in einen analogen Wert neu programmiert:

```

2 //Laserpowerhandling via M-Parameter
  IF ((pCncMParameter.MW[1]<>0) AND (doPowerControlLaser = 1)) THEN
  //Setting Laserpower when MW[1] unequal 0 (in W)
4  aoLaserleistung := (pCncMParameter.MW[1] * 32767)/1500;
  ELSIF ((pCncMParameter.MW[1] = 0) AND (aoLaserleistung <> 0)) THEN
6  //Setting Laserpower to 0 when MW[1]=0
  aoLaserleistung := 0;
8  END_IF

```

Listing 2.4: Teil der für die Leistungseinstellung verantwortlichen „SystemLaserHandling“ Action des Programms „SystemActions.st“

Der analoge Ausgang „AnalogOutput01“ des Moduls „X20AO2632“, welches mit dem Buskoppler verbunden ist, gibt ein Spannungssignal von 0 bis +10 V aus. Der Laser interpretiert dieses Spannungssignal wie folgt:

$$0\text{ V} \cong 0\text{ W}, \quad +10\text{ V} \cong 1500\text{ W} \quad \rightarrow \quad 1\text{ V} \cong 150\text{ W}$$

Dabei ist zu beachten, dass das Spannungssignal den Wert mit „L-MAX“ skaliert. Dementsprechend entspricht die vorgegebene Leistung nur dann dem Wert der M-Funktion MW1, wenn bei „L-MAX“ 100 % eingetragen ist. In der folgenden Tabelle sind alle Möglichkeiten zusammengefasst. Der Eintrag in der Spalte „L-SK“ entspricht der am Laserpanel eingestellten Quelle für „L-SK“. Der Wert „:1:A1“ korrespondiert mit dem Wert von MW1:

MW1	L-MAX	L-SK	vorgegebene Leistung in Watt
0	100 %	1:A1	$1500 W \cdot 100 \% \cdot 0 \% = 0 W$
0	63 %	1:A1	$1500 W \cdot 63 \% \cdot 0 \% = 0 W$
0	100 %	0:FIX	$1500 W \cdot 100 \% = 1500 W$
0	0 %	0:FIX	$1500 W \cdot 0 \% = 0 W$
1000	100 %	1:A1	$1500 W \cdot 100 \% \cdot 66 \% = 1000 W$
1000	63 %	1:A1	$1500 W \cdot 63 \% \cdot 66 \% = 630 W$
1000	100 %	0:FIX	$1500 W \cdot 100 \% = 1500 W$
1000	0 %	0:FIX	$1500 W \cdot 0 \% = 0 W$

Tabelle 2.11.: Leistungsstellung nach dem Umbau

Über die Anpassung von „L-MAX“ kann die gewünschte Leistung schnell am Laserpanel verändert werden, ohne das CNC-Programm verändern zu müssen! Zu beachten ist dabei, dass alle Leistungswerte im Ablauf des CNC-Programms gleichermaßen skaliert werden.

Die Minimalleistung ist nicht näher definiert. Es ist aber eine „typische“ Laserleistung von 150 - 1500 W angegeben (vgl. [12], S. 130/8-1).

2.6.5. Einstellung der Pulsfrequenz

Die Pulsfrequenz des Lasers kann ausschließlich am Bedienpanel des Lasers verändert werden. Eine Verknüpfung mit den analogen Eingängen des Lasers ist vom Hersteller des Lasers nicht vorgesehen.

Die Frequenz darf 2 - 5000 Hz betragen. Wird der Wert 0 eingegeben, kann man ein Programm mit geöffnetem Verschluss, aber ohne Leistung abfahren (vgl. [12], S. 97/6-31).

2.6.6. Einstellung des Tastverhältnisses

Das Tastverhältnis, bzw. die Pulsdauer konnte vor dem Umbau ebenfalls nur am Laserpanel verändert werden. Nach dem Umbau kann das Tastverhältnis über den M-Parameter MW[2] folgendermaßen eingestellt werden:

$$MW[2]=80 \text{ für } 80 \% \text{ Tastverhältnis}$$

Für die Umsetzung des Tastverhältnisses in einen analogen Wert ist folgender Code notwendig:

```

2 //Duty cycle (Tastverhältnis) via M-Parameter
  IF (pCncMParameter.MW[2] <> 0) THEN
4 //Setting aoA2 when MW[2] unequal 0 (in %)
  aoA2 := (pCncMParameter.MW[2] * 32767)/100;
  ELSIF ((pCncMParameter.MW[2] = 0) AND (aoA2 <> 0)) THEN
6 //Setting aoA2 to 0 when MW[2]=0
  aoA2 := 0;
8 END_IF

```

Listing 2.5: Teil der für die Einstellung des Tastverhältnis verantwortlichen „SystemLaser-Handling“ Action des Programms „SystemActions.st“

Unplausible Werte (kleiner Null und größer 100) werden abgefangen und auf einen plausiblen Wert gesetzt.

Das minimale Tastverhältnis ist nicht explizit festgesetzt, es ergibt sich aus der kleinsten zulässigen Pulsdauer ($0,026\text{ ms}$) und der Pulsfrequenz (vgl. [12], S. 97). Folgende minimale Tastverhältnisse ergeben sich:

Frequenz in Hz	minimales Tastverhältnis
2	0,0052 %
100	0,26 %
1000	2,6 %
5000	13 %

Tabelle 2.12.: Minimale Tastverhältnisse

Das minimale Tastverhältnis ist nicht konstant, weshalb nur Werte unter Null im Programm als unplausibel abgefangen werden.

2.6.7. Dritter Analogausgang der SPS

Der dritte analoge Ausgang der SPS kann benutzt werden, um einen dritten, unabhängigen Wert an den Laser zu übergeben. Unbedingt notwendig ist dieser dritte analoge Ausgang der SPS jedoch nicht, da nur Leistung und Pulsdauer über die externe Schnittstelle des Lasers verändert werden können. Der dritte analoge Ausgang der SPS kann folgendermaßen im CNC-Programm gesetzt werden:

MW[3]=65 für 65 %

Eine Eingabe im CNC-Programm erfolgt in %, wobei 100 % den analogen Ausgang der SPS auf 100 % schaltet. Folgender Code ist für die Umsetzung notwendig:

```

//Analog Out 3 via M-Parameter (spare)
2 IF (pCncMParameter.MW[3]<>0) THEN
//Setting aoA3 when MW[3] unequal 0 (in %)
4 aoA3 := (pCncMParameter.MW[3] * 32767)/100;
ELSF ((pCncMParameter.MW[3] = 0) AND (aoA3 <> 0)) THEN
6 //Setting aoA3 to 0 when MW[3]=0
aoA3 := 0;
8 END_IF

```

Listing 2.6: Teil der „SystemLaserHandling“ Action des Programms „SystemActions.st“, der ebenfalls zur Steuerung des Lasers verwendet werden kann

2.7. Visualisierungsanpassungen

Durch die Implementierung eines neuen Lasers mit geänderter Funktionalität muss sich auch das GUI (Graphical User Interface) am Bedienpanel der Steuerung ein wenig ändern. Die Änderungen betreffen die Infoleiste („StatusInfoBar“) am unteren Rand des GUIs, die Seite „Wiki“ und die Seite „Parameter“.

2.7.1. Infoleiste

Die Infoleiste gibt einen Überblick über den Zustand der Anlage (siehe Abb. [2.31](#))

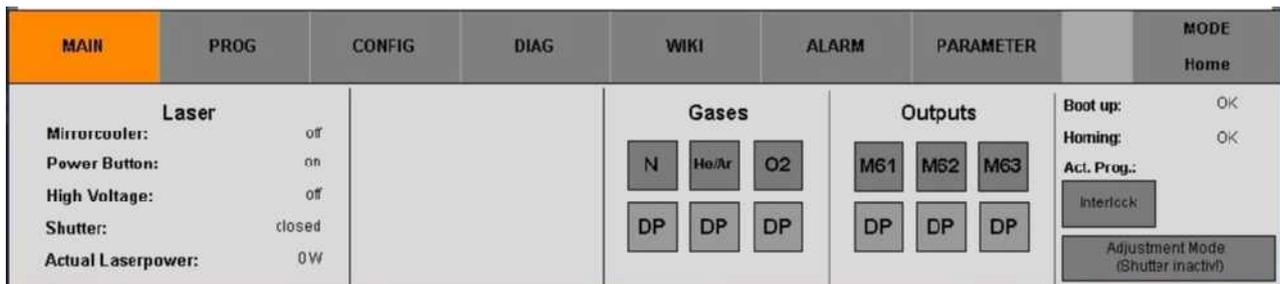


Abbildung 2.31.: Infoleiste des GUI, des Bedienpanels der SPS

Die Spalte „Laser“ gibt nun einen chronologischen Überblick über den Zustand des Lasers und des Spiegelkühlers. Folgende Einblendungen finden sich im linken unteren Eck der Infoleiste:

Englisch	Deutsch	Zustände	Beschreibung
Mirrorcooler:	Spiegelkühler:	off/on	Gibt an, ob der Spiegelkühler eingeschaltet ist
Power Button:	Netz ist:	off/on	Gibt an, ob das „Netz“ des Lasers eingeschaltet ist
High Voltage:	Hochspannung:	off/on/error	Gibt an, ob die Hochspannung des Lasers eingeschaltet ist
Shutter:	Verschluss:	off/on/error	Gibt den Zustand des Verschlusses des Lasers an
Actual Laserpower:	Aktuelle Laserleistung:	0-1500 W	Zeigt die aktuelle Laserleistung an (Quelle: analoges Spannungssignal vom Laser)

Tabelle 2.13.: Einblendungen zum Zustand des Lasers in der Infoleiste

Diese Informationen können alle auch am Bedienpanel des Lasers eingesehen werden, jedoch hilft eine Anzeige des Zustandes am Bedienpanel der SPS, schnell einen Überblick zu bekommen. Neu hinzugekommen sind die Anzeigen zum Zustand des Lasernetzes und der aktuellen Laserleistung. Die Anzeige zum Zustand der Hochspannung zeigte vor dem Umbau falsche Informationen, diese ist nun berichtigt.

Die zweite Änderung betrifft den Zustand der SPS, bzw. der angehängten Servoverstärker und des CNC-Kernels. Ganz rechts in der Infoleiste werden ebenfalls in chronologischer Reihenfolge folgende Dinge angezeigt:

Englisch	Deutsch	Zustände	Beschreibung
Boot up:	Hochfahren:	busy/OK	Gibt an, ob die Anlage erfolgreich hochgefahren ist
Homing:	Referenz:	error/OK	Gibt an, ob die Anlage referenziert wurde
Act. Program:	Akt. Programm:	Programmname	Gibt den Programmnamen des aktuell geladenen Programms an

Tabelle 2.14.: Einblendungen zum Zustand des Verfahrenanlage in der Infoleiste

Neu hinzugekommen zu den Anzeigen der Verfahrenanlage ist die Anzeige des „Boot up“-Status. Das hat den Vorteil, dass man nun genau sieht, wann das System bereit ist referenziert zu werden. Davor musste man hören, ob die Servoverstärker die Bremsen lösen. Erst dann war es möglich in den „Homing“-Modus zu wechseln.

2.7.2. Seite „Main“

Auf der Seite „Main“ (siehe Abb. 2.32) wurde ein kurzer Text eingefügt. Er beschreibt die Funktion der Taste „HOLD“. Drückt man die Taste einmal, wird das CNC-Programm nach der Stelle angehalten, die gerade abgearbeitet wurde. Wird die Taste zweimal gedrückt, wird das Programm gestoppt. Die selbe Funktion hat auch die physische Taste „HOLD“ am Handbediengerät.



Abbildung 2.32.: Teil der Main-Ansicht des GUI, des Bedienpanels der SPS

2.7.3. Seite „Wiki“

Auf der Seite „Wiki“ (siehe Abb. 2.33) gibt es nun rechts oben eine Taste „M-Parameter/Functions“, mit der eine Aufstellung sämtlicher implementierter M-Parameter und M-Funktionen angezeigt wird. Somit ist es dem Bediener möglich, einfach an die nötigen Informationen zu kommen, ohne Gefahr zu laufen eine Dokumentation in Papierform der implementierten Befehle zu verlieren.

Auf dieser Seite wird der betreffende M-Parameter/Funktion mit seiner Funktion und einem Beispiel-CNC-Code gegenübergestellt. Sollten zu einem späteren Zeitpunkt neue M-Parameter/Funktionen hinzukommen, kann diese Seite einfach erweitert werden. Im linken, oberen Teil der Seite „Wiki“ finden sich die Tasten „Steel“, „Stainless Steel“ und „Aluminium“. Bei Druck auf eine der Tasten wird eine neue Seite geöffnet, auf der sämtliche, zu diesem Material ermittelten, Parameter zu sehen sein werden.

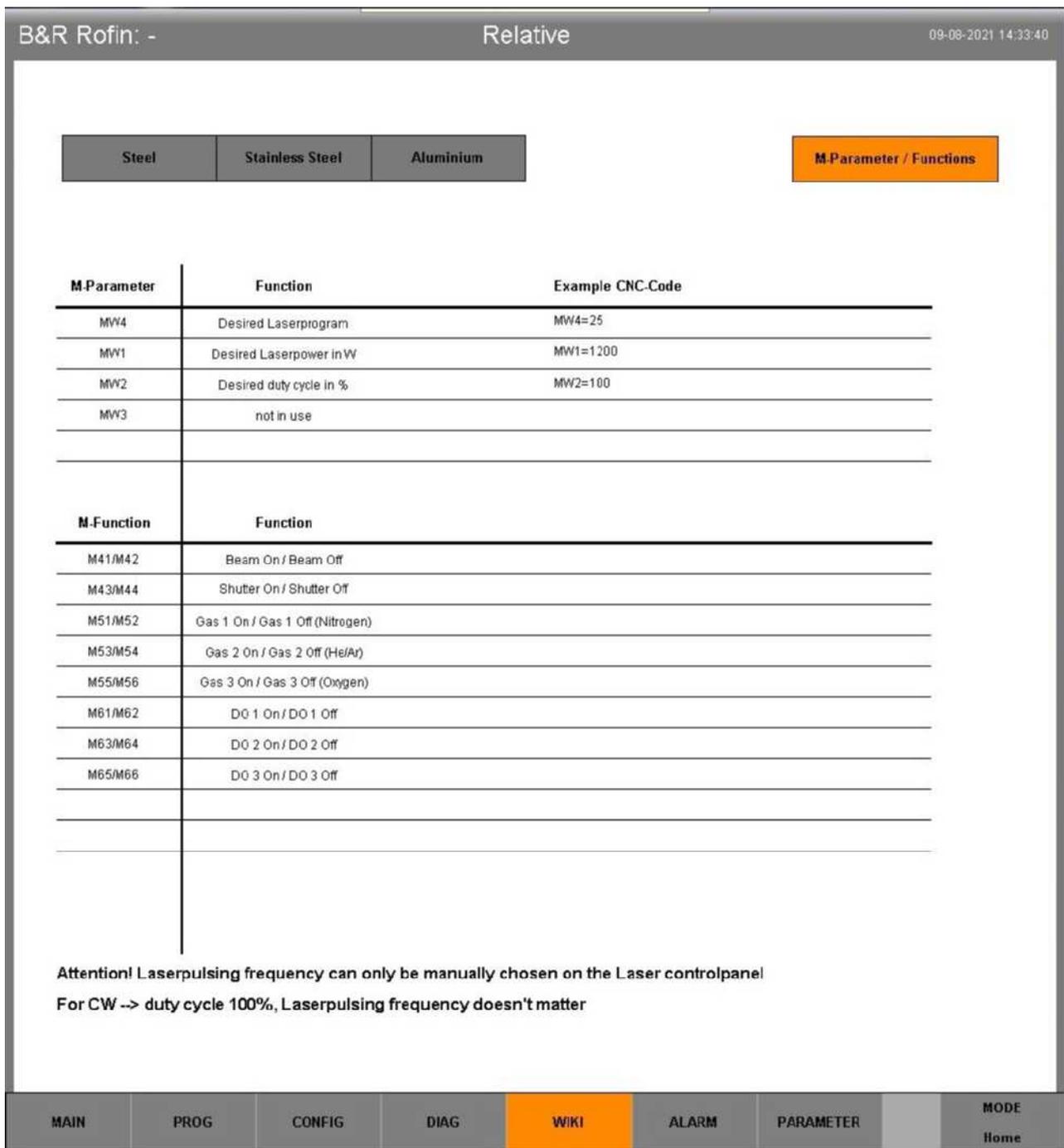


Abbildung 2.33.: Wiki-Ansicht des GUI, des Bedienpanels der SPS

2.7.4. Seite „Parameter“

Die Seite „Parameter“ gibt einen Überblick über erweiterte Informationen bzw. Einstellmöglichkeiten zum Laser und anderen Anlagenbestandteilen. Vor dem Umbau gab es im Bereich „Laser“ die Möglichkeit, den Zustand des Lasers einzusehen. Diese Information ist nun aus Gründen der Übersichtlichkeit in detaillierter Form in der Infoliste abzulesen. Außerdem konnten hier der Lasermodus und die Laserleistung eingestellt werden. Das geht nun nur mehr im CNC-Programm bzw. über das Bedienpanel des Lasers. Auch das soll zur besseren Übersichtlichkeit beitragen. Die einzige Information die nun angezeigt wird, ist die Position des Schlüsselschalters am Laserbedienpanel. Soll das Laserprogramm, bzw. die Laserleistung und das Tastverhältnis aus dem CNC-Programm heraus gesteuert werden, muss der Schlüsselschalter auf „Automatik“ stehen (siehe Abb. [2.34](#)).

Der Rest der Information auf dieser Seite blieb gleich. Die Anzeigen und Einstellmöglichkeiten zur „Distance Control“ wurden bewusst nicht entfernt, um bei einem späteren, neuerlichen Einbau einer Abstandsregelung die Einbindung ins GUI zu erleichtern.

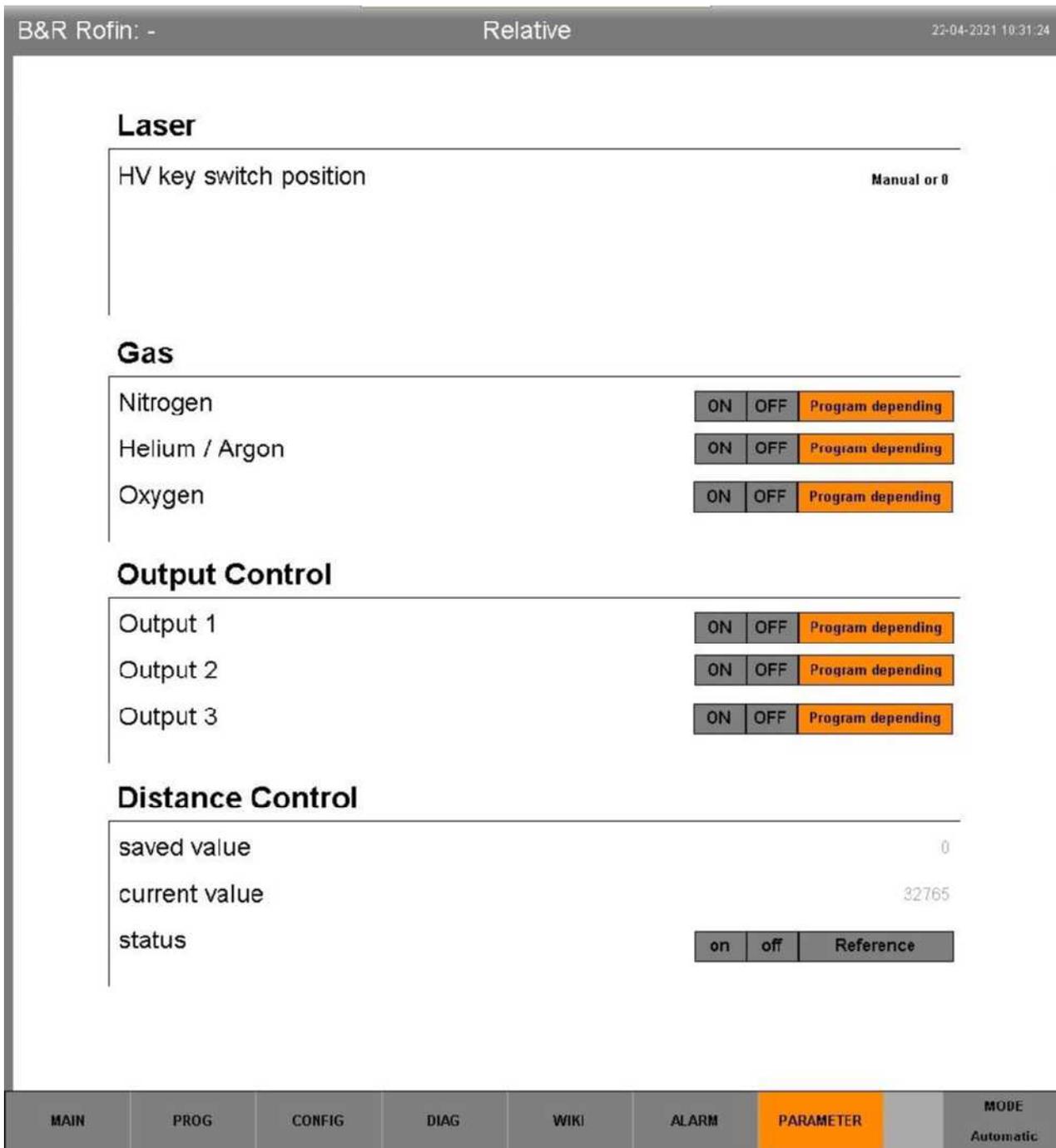


Abbildung 2.34.: Parameter-Ansicht des GUI, des Bedienpanels der SPS

3. Optimierung des Einstechverhaltens

3.1. Motivation

Für die Optimierung des Einstechvorgangs in Metallbleche beim Laserschneiden gibt es vor allem wirtschaftliche Gründe. Ziel ist es, in jedem Fall die Parameter des Einstichprozesses so weit zu optimieren, dass ein folgender Konturschnitt erfolgreich durchgeführt werden kann. Dafür soll der Durchmesser des Einstichs möglichst gleich der Schnittspaltbreite sein. Es können außerdem andere Gütekriterien gefunden werden, die aber für das Ziel des Einstichs im Konturschnitt nebensächlich sind. Dazu zählt eine möglichst kleine Wärmeeinflusszone (WEZ) und geringe Oxidation rund um den Einstich.

Aus wirtschaftlicher Sicht können folgende Vorteile optimaler Parameter für Einstiche gefunden werden (vgl. [8], S. 2):

- Reduktion von Ausschuss, bzw. eine bessere Nutzung der Bleche durch Wegfall des verbindenden Schnitts von der Einstichstelle zum Konturschnitt
- Reduktion der notwendigen Zeit um einzustechen

Die optimalen Parameter für einen spezifischen Anwendungsfall hängen unter anderem von der verwendeten Laserquelle, der Fokussieroptik und der Verfahrenanlage ab.

3.2. Laserquelle

Die Art der Laserquelle hat einen entscheidenden Einfluss auf die Strahlparameter bzw. die Qualität des Strahls. Die Funktionsweise ist sehr komplex, daher sollen nachfolgende Erläuterungen nur einen groben Überblick liefern.

3.2.1. Funktionsweise des CO₂-Lasers

CO₂-Laser, egal welcher Bauart teilen sich denselben physikalischen Hintergrund, jedoch nicht denselben Aufbau. Der Aufbau des Lasers, der in dieser Arbeit behandelt wird, ist in Abbildung 3.1 gezeigt.

Es handelt sich um einen sogenannten CO₂-Slab-Laser (CO₂-Platten-Laser) mit einer Hochfrequenz- und Hochspannungsanregung. Die beiden Elektroden (Wellenleiter) haben eine große Fläche verglichen zur Dicke des Spaltes, in dem sich die aktive Zone befindet. Das hat den Grund, dass Wärme möglichst gut abgeführt werden soll, um den Wirkungsgrad zu erhöhen. Man spricht bei dieser Bauform vom „diffusionsgekühlten CO₂-Laser“, mit dem hohe Leistungen, bei gleichzeitig hoher Strahlqualität möglich sind. (vgl. [9], S. 148)

An der Rückseite des Resonators befindet sich ein konkaver Spiegel (Rückspiegel), der die Laserstrahlung im Zick-Zack-Kurs durch die aktive Zone zu einem kleineren, konkaven Spiegel an der Vorderseite führt (Auskoppelspiegel). Ein Teil der Laserstrahlung kommt am vorderen Spiegel vorbei und wird durch einen Laserstrahlformer in den Rohstrahl, mit einem Durchmesser von 20 - 25 mm, geformt (vgl. [12], S. 130/8-1). Der Laserstrahlformer ist außerdem der Punkt, an dem die optische Leistung gemessen wird (vgl. [12], S.27/3-2).

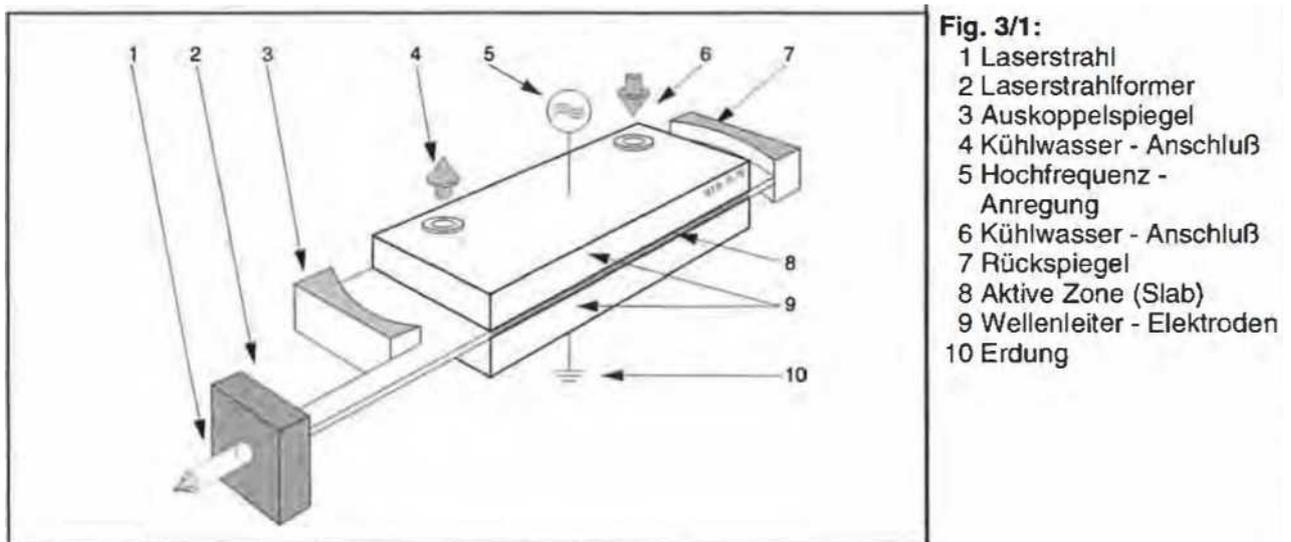


Abbildung 3.1.: (vgl. [12], S. 26/3-1). Aufbau der Laserquelle der umgebauten Anlage

In Strahlrichtung nach dem Strahlformer befindet sich der Verschluss (sog. Shutter). Dabei handelt es sich um einen drehbaren, gekühlten Spiegel, der den Rohstrahl entweder in einen Absorber leitet, oder aus dem Lasergehäuse (siehe Abb. [3.2]). Der Spiegel wird über einen Drehmagnet bewegt (vgl. [12], S. 27/3-2, S. 124/7-10).



Abbildung 3.2.: Verschluss und Absorber

Der hier behandelte Laser wird mit einem sog. „ROFIN-SINAR Spezial-Premix“ Gasgemisch betrieben. Es besteht aus 65% Helium, 19% Stickstoff, 6% Kohlenmonoxid, 4% Kohlendioxid, 3% Xenon sowie 3% Sauerstoff (vgl. [5]) und befindet sich in einem abgeschlossenen Behälter, mit einem Druck von 200 hPa. Wenn dieser Druck nicht mehr innerhalb einer gewissen Toleranzschwelle liegt, oder eine bestimmte Anzahl an Betriebsstunden erreicht wurde, muss das Gas getauscht werden. Dazu evakuiert eine Vakuumpumpe den Resonator, danach wird frisches Gas eingeleitet.

Ganz allgemein erfüllen die Gase verschiedene Aufgaben. Stickstoff (N_2) wird von der Entladung zwischen den zwei Elektroden stark angeregt. Die Stickstoffmoleküle nehmen elektronisch metastabile Zustände ($\nu = 1, 2, \dots$), mit einer hohen Relaxationszeit, ein. Der angeregte Stickstoff ist in der Lage die CO_2 -Moleküle zur Schwingung anzuregen (durch Stöße), sodass die CO_2 -Moleküle auf ein oberes Laserlevel gebracht werden (siehe Abb. [3.3]).

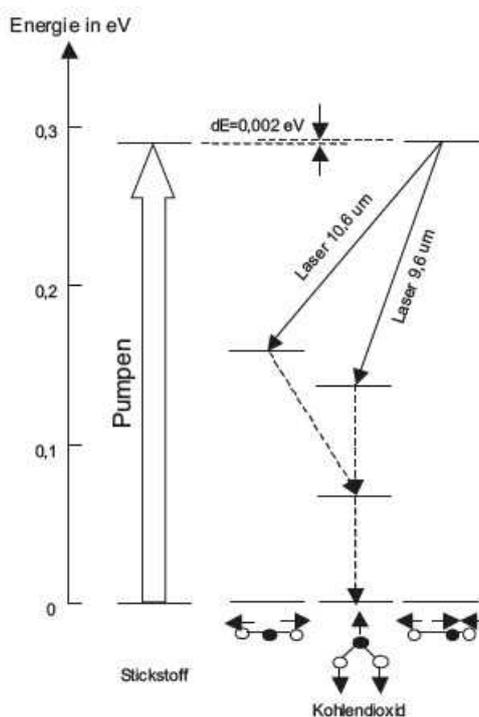


Abbildung 3.3.: (vgl. [2], S. 114). Überblick über Energieniveaus und Schwingungsformen eines CO_2 -Lasers

Der Stickstoff bildet einen guten Energiespeicher, der aber das Pulsen schwierig macht. Das obere Laserlevel des CO_2 -Moleküls entspricht einer asymmetrischen Streckschwingung. Von einer asymmetrischen Streckschwingung spricht man, wenn sich das Kohlenstoffatom auf molekularer Ebene entlang den Doppelbindungen, entgegen der zwei Sauerstoffatome, bewegt. Die CO_2 -Moleküle geben beim Übergang vom oberen ins untere Laserlevel Photonen mit $10,6 \mu m$ Wellenlänge ab. Die zweite mögliche Wellenlänge von $9,6 \mu m$ kann sich in den meisten Fällen nicht etablieren (vgl. [3], S. 100). Das untere Laserlevel entspricht, beim Laserübergang mit $10,6 \mu m$, einer symmetrischen Streckschwingung des CO_2 -Moleküls.

Die Energie der CO_2 -Moleküle, die sich energetisch am unteren Laserlevel befinden, wird ebenfalls durch Stöße, an das Helium abgegeben. Helium hat außerdem eine, im Vergleich zu Stickstoff, sehr hohe Wärmeleitfähigkeit (siehe Tab. [3.1]). Diese hohe Wärmeleitfähigkeit des Heliums ist von Vorteil, da die Wärmeenergie des Gasgemisches gut an die wassergekühlten Elektroden abgegeben werden kann und somit der Wirkungsgrad gesteigert wird (vgl. [2], S. 115).

Gas	Wärmeleitfähigkeit λ [$\frac{W}{mK}$] bei $t = 0^\circ C$
Stickstoff (N_2)	0,02
Kohlenstoffdioxid (CO_2)	0,0147
Helium (He)	0,143

Tabelle 3.1.: Wärmeleitfähigkeiten der Bestandteile des Gasgemisches des CO_2 -Lasers (vgl. [4], S. 339)

3.2.2. Ermittlung des Fokusabstands des Laserstrahls

Um valide Ergebnisse bei den folgenden Einstechversuchen zu erhalten, ist die Ermittlung der Fokusslage des Laserstrahls notwendig. Wichtig zu verstehen ist, dass der Abstand der Düse von der Werkstückoberfläche über die Bewegung in z-Richtung der Verfahrenanlage festgelegt werden kann („Standoff“ z_D). Unabhängig davon kann der Fokus, der annähernd einer Kreisfläche mit einem Radius r_F entspricht, bezogen zur Bearbeitungsoptik über einen Maßstab mit Skalenring eingestellt werden (Skalenmaß z_s bzw. Fokusslage z_F). Die Fokusslage wird dabei immer auf die Blechoberseite bezogen. Das Skalenmaß z_s gibt hingegen die Position des Fokus bezogen auf die Ebene der Austrittsöffnung der Düse an. In Abbildung 3.4 erkennt man, dass Abstände vom Werkstück weg positiv gezählt werden, ins Werkstück negativ. Der „Standoff“ ist negativ mit null begrenzt, da es sonst zur Kollision von Bearbeitungsdüse und Werkstück käme.

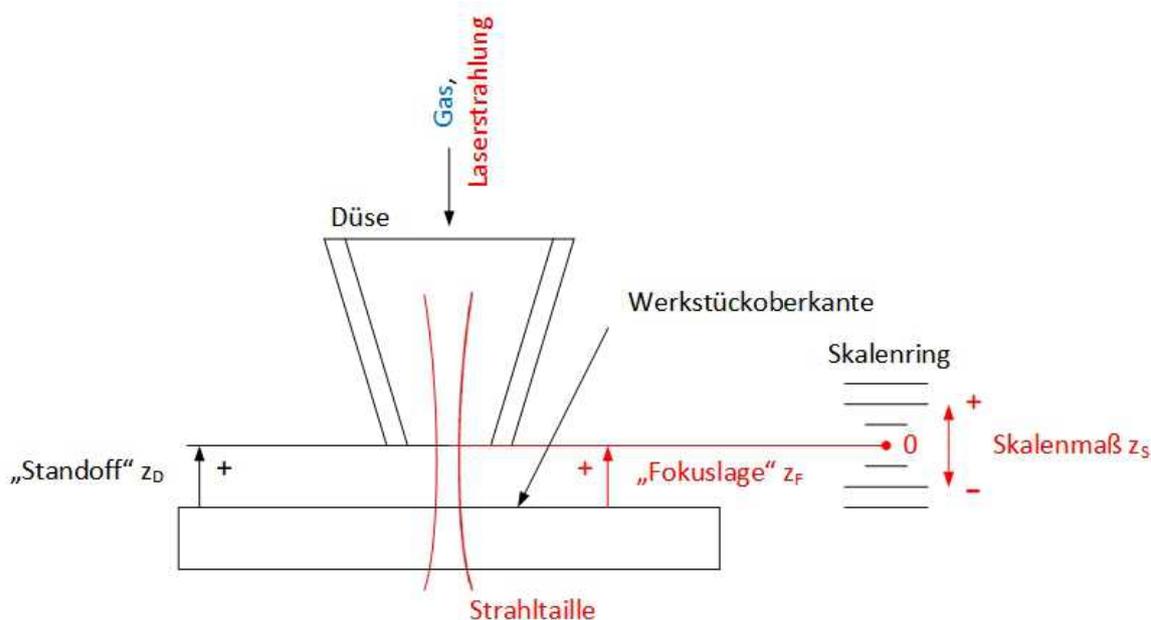


Abbildung 3.4.: Aufsicht auf die Bearbeitungsdüse mit wichtigen Abständen

Um die Fokuslage zu bestimmen, wird ein 1 mm Edelstahlblech unter der Austrittsdüse der Fokussieroptik eingespannt. Der „Standoff“ wird mit +1 mm eingestellt, was einem üblichen Wert zum Schneiden von Edelstahl entspricht (vgl. [10]). Es wird ein 500 ms Puls mit einer Leistung von 1000 W abgegeben (siehe Tab. [3.2]). Der Fokus wird dabei, über den Skalenring der Fokussieroptik, in 1 mm-Schritten von 4 mm über der Nullposition bis 3 mm unter der Nullposition, eingestellt. Die abgegebene Energie muss groß genug sein, um vollständig in das Material einzustechen, aber so klein wie möglich, um die Größe der Löcher minimal zu halten.

Leistung	Frequenz	Tastverhältnis	Burstzeit	Standoff	Fokuslage
1000 W	CW	CW	500 ms	1 mm	variabel

Tabelle 3.2.: Parameter für die Fokusermittlung

In Abbildung [3.5] sind acht Einstiche von eins bis acht durchnummeriert, wobei Einstich eins einer Skalenringeinstellung von vier Millimetern über der Nullmarkierung entspricht. Einstich acht entspricht einer Skalenringeinstellung von drei Millimetern unter der Nullmarkierung. Deutlich erkennbar ist, dass Einstich sechs den kleinsten Durchmesser aufweist. Dadurch, dass sich nur der Fokusabstand als Parameter zu den benachbarten Einstichen verändert, kann darauf geschlossen werden, dass der Fokus des Laserstrahls bei Einstich sechs näherungsweise auf der Werkstückoberseite liegen muss.



Abbildung 3.5.: Einstiche in 1mm Edelstahlblech mit unterschiedlichen Fokusabständen

Bei Einstich sechs ist die Einstellung einen Millimeter unter der Nullmarkierung. Durch den „Standoff“ von näherungsweise einem Millimeter ($z_D = 1\text{mm}$) kann darauf geschlossen werden, dass der Fokus bei der Nulleinstellung, genau in der Ebene der Düsenöffnung liegt (siehe Abb. [3.6]). Die Fokuslage z_F wird definitionsgemäß Null gesetzt, da der Fokus auf der Blechoberseite liegt.

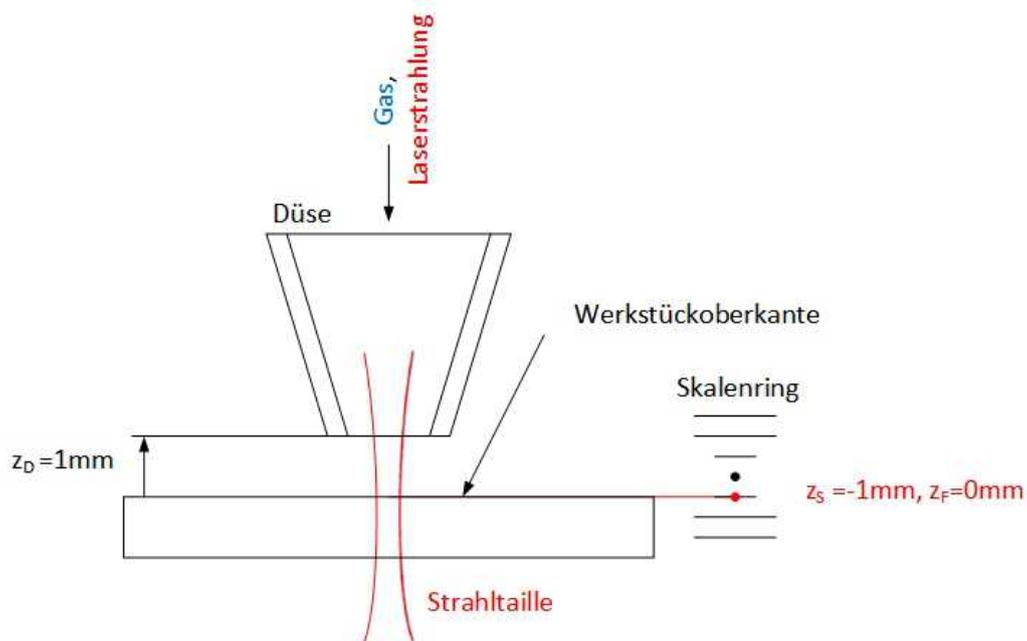


Abbildung 3.6.: Ermittlung der Fokuslage über Einstich sechs

Genauere Ergebnisse können mit dünneren Blechen oder mehr Versuchen mit kleineren Inkrementen des Abstands, des Fokus in z-Richtung erreicht werden. Die genaueste Vermessung kann mit speziellen Geräten zur Kaustikvermessung, bzw. zur Fokusermittlung erreicht werden.

3.2.3. Ermittlung der Strahlparameter des Laserstrahls

Um ein genaues Bild der Qualität des Rohstrahls und der Kaustik rund um den Fokuspunkt zu bekommen, wird die Laserstrahlung von einer externen Firma vermessen. Für die Messung der effektiven Leistung des Lasers wird die Bearbeitungsoptik ausgebaut und der abgelenkte, unfokussierte Rohstrahl trifft auf einen Messaufnehmer. Dieser ist mit Wasser gekühlt. Das Ganze befindet sich in einer Regelstrecke, wobei die Wassertemperatur den Sollwert von 20°C hat und die Stellgröße der Wasserdurchfluss durch den Messaufnehmer ist. In Abbildung [3.7](#) ist der Verlauf der vom Programm errechneten Effektivleistung in roter Farbe aufgetragen. In Grau ist die Wassertemperatur dargestellt und in Orange der Wasserdurchfluss durch den Messaufnehmer.

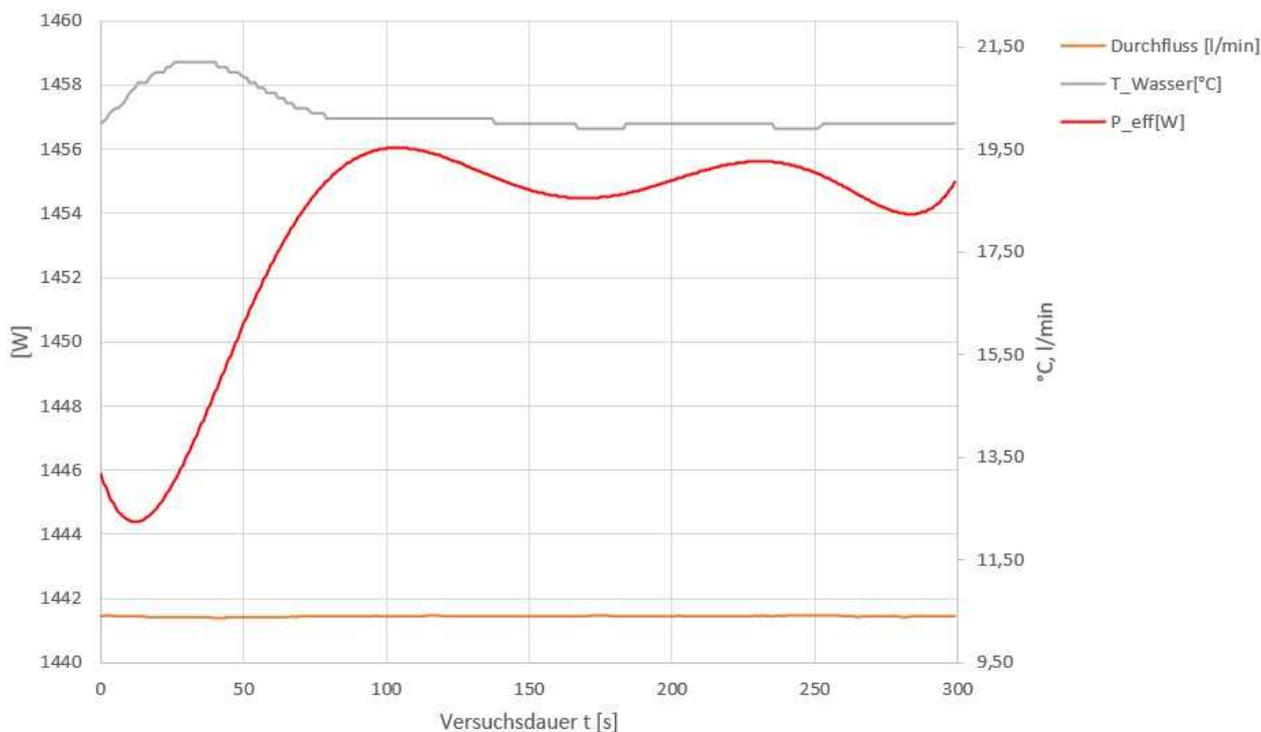


Abbildung 3.7.: Errechnete Effektivleistung des Rohstrahls bei 100 % Leistung im CW-Betrieb

Auffällig ist ein gewisser Einschwingvorgang. Durch Berechnung mit der Wassertemperatur, der spezifischen Wärmekapazität von Wasser, dem Volumenstrom und der Dichte des Wassers, wird die Leistung der auftreffenden Laserstrahlung ermittelt.

$$P_{eff} = T_{Wasser} * c_{Wasser} * \dot{V} * \rho_{Wasser} \quad (3.1)$$

Die maximale effektive Leistung, die am Messaufnehmer auftrifft, beträgt rund 1455 W. Aus dem aktuellen Servicebericht der Firma Rofin geht hervor, dass die Maximalleistung, gemessen im Strahlformer, 1520 W beträgt. Diese Differenz von 65 W kann mehrere Gründe haben. Einerseits sind beide Leistungsmessungen mit Fehlern verbunden und andererseits gibt es, im Strahlengang zwischen dem Strahlformer des Lasers und der Fokussieroptik, Verluste an Spiegeln. Es kann ein (theoretischer) Wirkungsgrad der Optiken vom Laser zur Fokussierlinse von 96 % berechnet werden:

$$\eta = P_{eff} / P_{Strahlformer} = 1455 \text{ W} / 1520 \text{ W} = 96 \% \quad (3.2)$$

Der nächste Schritt ist die Aufnahme der Intensitätsverteilung des Rohstrahls, woraus der Durchmesser des Rohstrahls und die Transversalen Moden bestimmt werden können. Dafür werden verschiedene Leistungen am Laser eingestellt und ein Messaufnehmer bestrahlt.

In Abbildung [3.8](#) ist die Intensitätsverteilung des Rohstrahls bei 10 % Leistung und CW-Betrieb dargestellt. Dabei trennen schwarze Linien Bereiche mit ähnlicher Intensität. 100 % entspricht der maximalen Intensität. In einem Radius von 5,521 mm beträgt die Intensität über 14 %. Gut erkennbar ist die Symmetrie der Verteilung. In Abbildung [3.9](#) ist ebenfalls

die Intensitätsverteilung bei 10% Leistung zu sehen mit zwei orthogonalen Schnitten. Die Verteilung ist annähernd gaussförmig mit einem Intensitätsmaximum im Zentrum des Strahls.

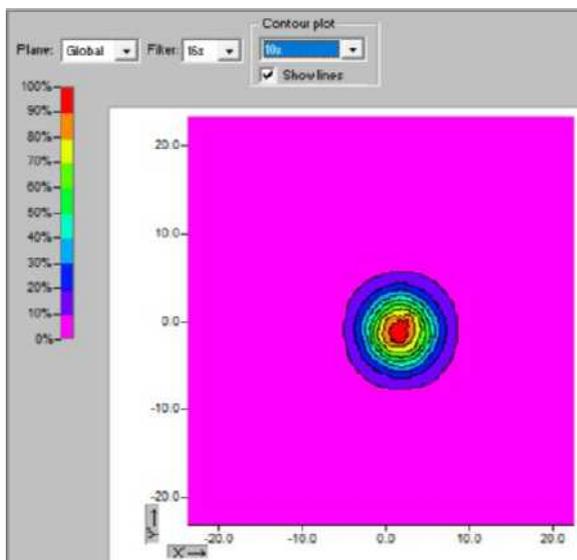


Abbildung 3.8.: Primes. Intensitätsverteilung des Rohstrahls bei 10%, CW

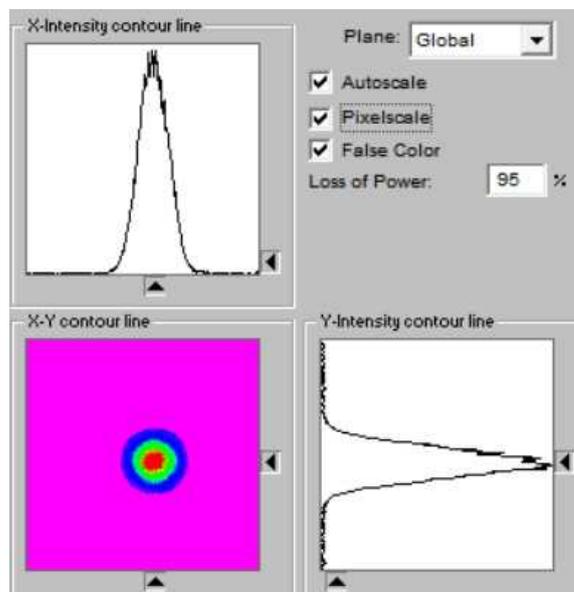


Abbildung 3.9.: Primes. Schnitt durch Intensitätsverteilung des Rohstrahls bei 10% CW

In Abbildung [3.10](#) ist die Intensitätsverteilung des Rohstrahls bei 100% Leistung und CW-Betrieb dargestellt. Schwarze Linien markieren Bereiche mit ähnlicher Intensität. Hier beträgt der Radius, in dem die Intensität größer 14% ist, 7,129 mm. Gut zu sehen ist, dass die Verteilung nicht symmetrisch um die Strahlachse ist. In Abbildung [3.11](#) ist die Intensitätsverteilung wiederum in zwei Ebenen geschnitten. Die dargestellten Kurven zeigen, dass zwar eine Gaussverteilung der Laserstrahlintensität vorliegt, diese aber ein lokales Minimum in der Nähe der Strahlachse aufweist.

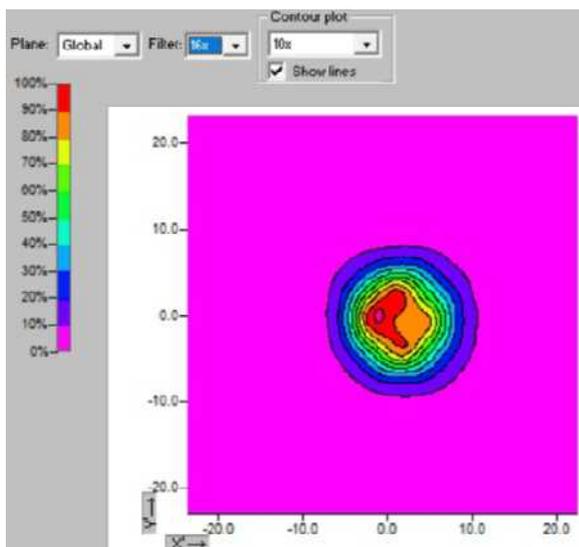


Abbildung 3.10.: Primes. Intensitätsverteilung des Rohstrahls bei 100 %, CW

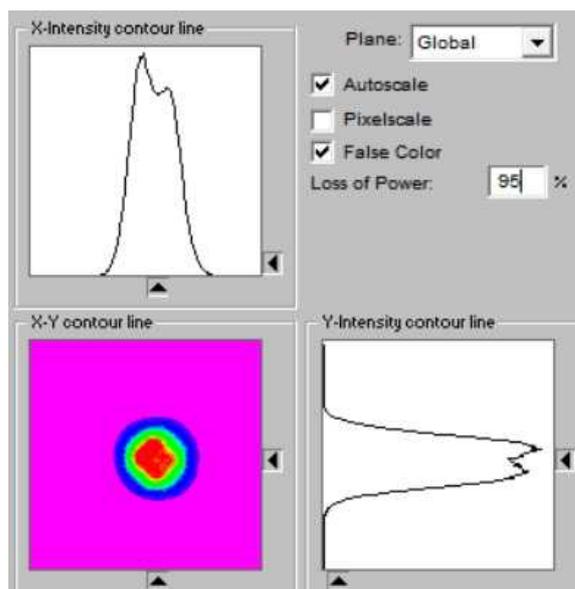


Abbildung 3.11.: Primes. Schnitt durch Intensitätsverteilung des Rohstrahls bei 100 % CW

Der Strahldurchmesser steigt mit steigender Leistung und die Strahlqualität nimmt ab. Mit einem Stück kariertem Papier und eingeschaltetem Positionierlaser kann gezeigt werden, dass die auftreffende Laserstrahlung nicht ganz koaxial zur y-Achse der Verfahrenanlage ist. Verfährt man die y-Achse um 1170 mm von einer Endposition zur anderen, weicht der Punkt des Positionierlasers ca. 2,5 mm nach rechts oben ab (eine Kästchenbreite entspricht 5 mm, siehe Abb. 3.12 und 3.13). Die Position der auftreffenden Laserstrahlung auf die Fokussieroptik ist somit geringfügig abhängig von der Stellung der y-Achse.

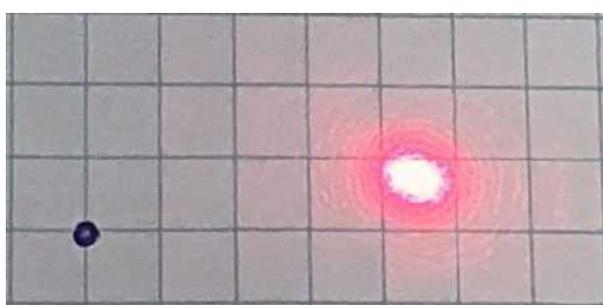


Abbildung 3.12.: Positionierlaserpunkt bei y=0 mm

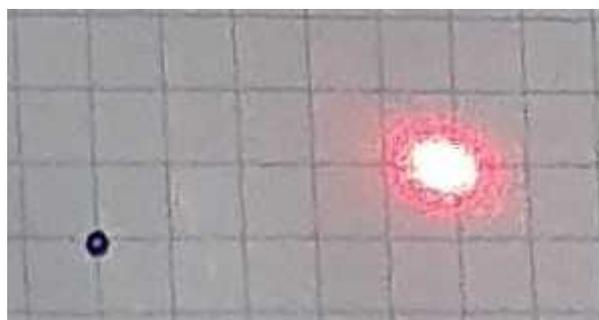


Abbildung 3.13.: Positionierlaserpunkt bei y=1170 mm

Für den Schneidprozess ist die Qualität des fokussierten Laserstrahls von Bedeutung. Um die entsprechenden Parameter wie Fokuslage, Fokusbereich, Strahlparameterprodukt (BPP), bzw. Beugungsmaßzahl (M^2) zu ermitteln, wird ein Messgerät unter der Bearbeitungsoptik

platziert. Die in Abbildung 3.14 dargestellte Kaustik wurde mit einer Fokussierlinse, mit einer Brennweite von fünf Zoll (127 mm), aufgenommen.

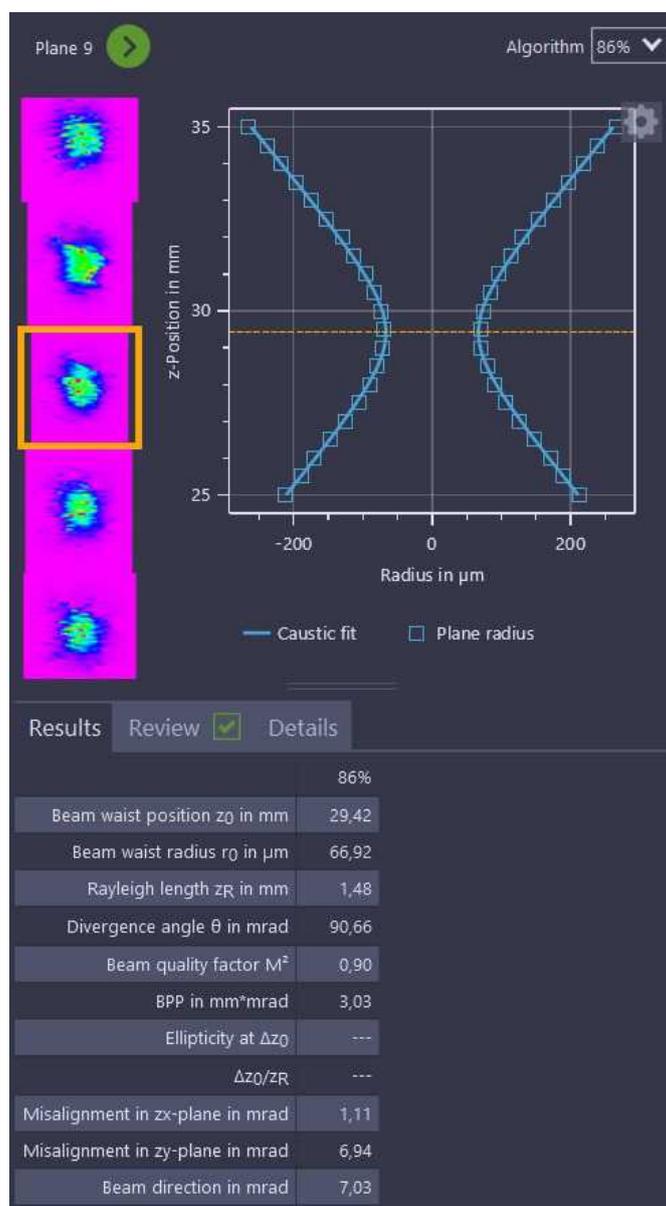


Abbildung 3.14.: Primes. Ergebnisse der Kaustikvermessung des fokussierten Laserstrahls bei 100% Leistung

Der minimale Durchmesser der Strahltaile beträgt $67 \mu\text{m}$. Das Strahlparameterprodukt wurde mit $3,03 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ von der Software berechnet. Daraus ergibt sich eine Beugungsmaßzahl M^2 von 0,9. Laut Definition hat die ideale Gaussverteilung der Intensität eine Beugungsmaßzahl von 1. Schwingen höhere Moden als die Grundmode mit, kann die Beugungsmaßzahl größer Eins werden. Beugungsmaßzahlen kleiner Eins sind jedoch nicht möglich. (vgl. [2], S. 87), (vgl. [3], S. 237)

Nach Rücksprache mit dem Hersteller des Messgeräts muss es sich um einen Bedienungsfehler

des Messgeräts handeln. Die Nadel, die als Messaufnehmer dient, könnte beschädigt worden sein, was zu verfälschten Werten führen kann. Die Firma, die die Messung durchgeführt hat, konnte keine zufriedenstellende Antwort liefern.

3.3. Stand der Technik

Die Aufnahme des Standes der Technik ist von wesentlicher Bedeutung, da so vergleichbare Gütekriterien für Einstiche gefunden werden können. Außerdem soll ein Set an Ausgangsparametern für die Einstichversuche gefunden werden. Dafür in Frage kommen Literaturquellen, die ähnliche Fragestellungen beleuchten und die Normen DIN EN ISO 9013, DIN EN ISO 17658 sowie die VDI-Richtlinie 2906.

3.3.1. Anlagenstand nach dem Umbau

Nach dem Umbau der Anlage, genauer der Neuverkabelung der Verbindung von SPS und Laser, stehen neue Funktionen zur Verfügung. Folgende Parameter können entweder direkt im CNC-Programm oder am Bedienpanel des Lasers eingestellt werden:

- Anwahl von allen 64 „Pulsprogrammen“ des Lasers
- Abgabe von gepulster Laserstrahlung mit folgenden Rahmenbedingungen:
 - Pulsfrequenz von 2 – 5000 Hz
 - Tastverhältnis von 0 – 100 %
 - Grenzen der Pulsdauer: 26 μs bis 125 ms
- Abgabe von sog. „Bursts“, also Einzelpulsen
- Leistungsstellung von 0 – 1500 W
- Variation von Leistung und Frequenz/Tastverhältnis im CNC-Programmablauf

3.3.2. Gütekriterien

Laserschnitte können eine Vielzahl von Fehlern, bzw. Unregelmäßigkeiten aufweisen. Eine grobe Gliederung möglicher Fehler gibt die DIN EN ISO 17658:2015 (S.13) an:

- Unregelmäßigkeiten an Schnittkanten
- Unregelmäßigkeiten an Schnittflächen
- Schlacken
- Risse
- Sonstige Unregelmäßigkeiten

In DIN EN ISO 9013:2017-05 gibt es eine Definition der Schnittflächenqualität unter dem Gesichtspunkt der Tolerierung von Laserschnitten. Folgende Kenngrößen werden angegeben:

- Rechtwinkligkeits- oder Neigungstoleranz u
- gemittelte Rauhtiefe Rz 5

Die ausführlichste Übersicht über Qualitätskriterien bei Laserstrahlschnitten ist in VDI 2906 Blatt 8, S.3 zu finden:

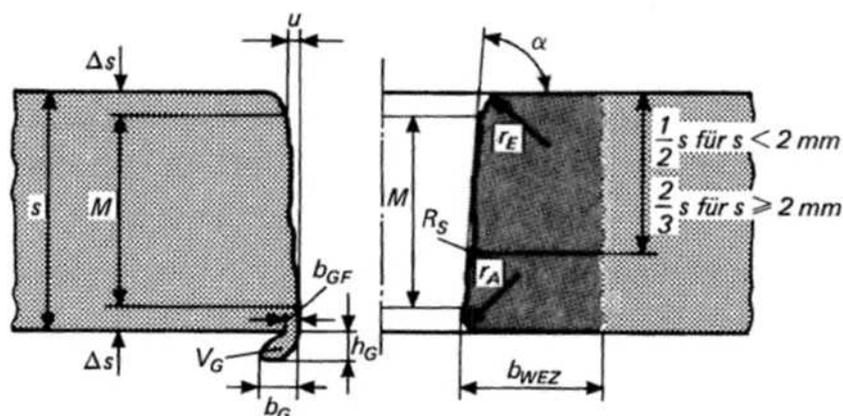


Bild 2. Kenngrößen an Schnittflächen beim Laserstrahlschneiden (dargestellt für Soll-Flankenwinkel $\alpha=90^\circ$, vgl. Abschnitt 5, Ergänzende Bemerkungen)

r_E	Anschmelzung der Schnittkante (Strahleintrittsseite)
α	Flankenwinkel
u	Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz
R_S	Rauheit der Schnittfläche: Üblich ist die Angabe der gemittelten Rauhtiefe $R_{z, \text{DIN}}$.
r_A	Anschmelzung der Schnittkante (Strahlaustrittsseite)
V_G, b_G, h_G	Gratvolumen, -breite und -höhe; alternativ auch „Bart“ statt „Grat“
b_{GF}	Gratfußbreite
b_{WEZ}	Wärmeeinflusszone (WEZ)
s	Blechdicke
	$\Delta s = 0,1 s$ für $s < 2 \text{ mm}$
	$\Delta s = 0,2 \text{ mm}$ für $s \geq 2 \text{ mm}$
M	Meßbereich zur Bestimmung von u, α und b_{WEZ}

Abbildung 3.15.: Überblick über Qualitätskriterien, bzw. Kenngrößen von Laserstrahlschnitten

Dabei ist zu beachten, dass Abbildung [3.15](#) nur bedingt geeignet zur Darstellung von in Schnittrichtung wiederkehrenden Phänomenen, wie Rillenbildung, ist.

Der Vorgang des Einstechens mit Laserstrahlung, also dem Eröffnen eines Schneidspaltes, ist am ehesten mit Laserbohren zu vergleichen. Es wurden keine passenden Normen für Gütekriterien des Prozesses Laserbohren gefunden. Für eine grobe Betrachtung der Qualität der Einstiche werden demnach die Gütekriterien des Laserstrahlschneidens herangezogen. Folgende Qualitätskriterien sollen eine Beurteilung der Probeeinstiche erlauben:

- geringe Anschmelzung der Schnittkanten
- keine, bzw. geringe Gratbildung
- kleine Wärmeeinflusszone (wenig sichtbare Verfärbung der Umgebung des Einstichs)

3.3.3. Einstechprozeduren

Um einen sinnvollen Ausgangspunkt für Einstechversuche zu erhalten, bietet sich eine Literaturrecherche an.

Bestrahlt man ein metallisches Werkstück mit Laserstrahlung, gibt es eine Wechselwirkung zwischen den Photonen der Laserstrahlung (elektromagnetisches Feld) und den freien Elektronen des Metalls. Die Elektronen werden innerhalb weniger Femtosekunden zur Schwingung angeregt und geben diese Schwingungen durch Stöße untereinander weiter. Nach spätestens wenigen Pikosekunden haben die Elektronen die Gitteratome zu kollektiven Schwingungen angeregt und die Elektronen und das Atomgitter weisen identische Temperaturen auf. (vgl. [9], S. 30ff), (vgl. [13], S. 11)

Mit kurzen Laserpulsen können Metalle mit hoher Präzision, minimaler WEZ und praktisch frei von anhaftendem Schmelzfilm abgetragen werden. Durch eine hohe Spitzenleistung und einem sehr geringen Energietransport in das Materialinnere während eines kurzen Laserpulses kann ein eng definiertes Materialvolumen nahezu schlagartig verdampft werden. Die aufgebrauchte Verdampfungsenthalpie kühlt das verbleibende Material und verhindert zu einem Teil die Erwärmung der Umgebung durch Wärmeleitung. Derartige Bohrungen weisen i.d.R. glatte Kanten, wenig bis keine WEZ und ebenso kaum bis keinen anhaftenden Schmelzfilm auf. (vgl. [9], S. 96, S. 293)

Wird ein Metall mit längeren Pulsdauern bestrahlt, wird die Wärmeleitung immer dominierender. Es wird Material aufgeschmolzen und es bildet sich ein Schmelzbad, das sich normal zur Richtung der Einwirkung des Laserstrahls ausbreitet. Es kommt zur Ausbildung einer WEZ, in der eine physikalische Umwandlung passiert. Die auftreffende Laserstrahlung wird vom geschmolzenen Metall zum Teil absorbiert und es kommt zur Gas- und Plasmabildung. Flüssiges Metall wird durch den Druck des Plasmas aus der Bohrung getrieben. Es entstehen größere, weniger maßhaltige, Bohrungen als beim Bohren mit kurzen Laserpulsen. Das Einstechen in Metall mit Laserstrahlung folgt denselben physikalischen Rahmenbedingungen wie Laserbohren. Anders als beim Einstechen, wo Maßhaltigkeit eine untergeordnete Rolle spielt, steht die Maßhaltigkeit der Bohrungen beim Laserbohren im Vordergrund. (vgl. [6], S. 28), (vgl. [7], S. 82), (vgl. [8], S. 1), (vgl. [9], S. 295)

Die sogenannte thermische Eindringtiefe gibt einen Zusammenhang zwischen Pulsdauer, Wärmeleitfähigkeit und der „Tiefe“ der WEZ an. Es gilt: Je kürzer die Pulsdauer und je schlechter die Wärmeleitfähigkeit, desto kleiner die WEZ. (vgl. [13], S. 12)

Abhängig von der Bewegung des Laserstrahls relativ zum Werkstück spricht man von Einzel-pulsbohren, Perkussionsbohren oder Trepanieren (vgl. [13], S. 8).

Verschiedene Arbeiten haben sich bereits mit der Optimierung von Einstichprozessen mit Laserstrahlung befasst. Eine Arbeit zeigt die Möglichkeit der Kombination von konventionellem und dampfdominiertem Laserbohren auf, um effizient große Durchmesser zu bohren, die gleichzeitig eine hochwertige Oberfläche haben sollen. Dabei wird mit einem Laser (6 kW Pulsspitzenleistung, vgl. [13], S. 22) durch Pulsen im Milli- bis Mikrosekundenbereich, eine große Menge an Material konventionell im Schmelzbohrverfahren abgetragen. In einem zweiten Schritt werden die Oberflächen der Bohrung mit Pulsen im Pico- und Femtosekundenbereich begradigt und rekristallisiertes Material entfernt. Durch die kurze Pulsdauer wird ein Ausbilden eines großen Schmelzbades verhindert und das Material schnell von der festen in die gasförmige Phase gebracht. Die Spitzenleistung des Lasers, der für den zweiten Bear-

beitungsschritt verwendet wird, ist vergleichsweise gering (400 W max. mittlere Leistung, vgl. [13], S. 26f.). (vgl. [13], S. 4ff)

Für das Laserstrahlschmelzbohren wird ein Gas zum Ausblasen von abgetragenem Material benutzt, das die Oxidation der Schnittstellen verhindern soll. Das kann Stickstoff oder ein Gas aus der achten Hauptgruppe sein (Edelgas). Bei un-, oder niederlegierten Stählen kann Oxidation im Schnittspalt bewusst durch einen Sauerstoffgasstrahl erzwungen werden. Durch die exotherme Oxidationsreaktion kann die Schnittgeschwindigkeit erhöht werden. Man spricht vom Laserstrahlbrennschneiden. (vgl. [3], S. 401f.) Das Äquivalent beim Bohren wäre Laserstrahlbrennbohren.

Eine Arbeit zeigt eine signifikante Verbesserung der Einstichqualität beim Sauerstoffunterstützten Einstechen durch eine sog. „Power ramped pulsed mode laser piercing technique“. Dabei wird ein Transversalflow, 1 kW, CW-CO₂-Laser benutzt um in 1,5 mm dünnen Baustahl einzustechen. Im „Normal Pulsed Mode“ (NPM) wird der Laser gepulst mit konstanter Amplitude betrieben, wohingegen der „Power Ramped Pulse Mode“ (PRPM) zu Beginn des Einstichvorgangs eine Rampe erfährt. Die Amplitude der Pulse wird innerhalb der Einstichzeit bis zur maximalen Leistung des Lasers erhöht. (vgl. [11], S. 1109)

Es zeigt sich, dass das größte Problem beim Sauerstoffunterstützten Einstechen die unkontrollierte Oxidation an der Oberfläche des Einstichs ist. Die PRPM-Technik soll die eingebrachte Leistung solange verringern, bis die Interaktionsebene von Laserstrahlung und Material unter der Oberflächenebene liegt. Das soll die Oberfläche vor Erhitzung über den Brennpunkt schützen und damit eine übermäßige Oxidation in Form eines Ausbrandes verhindern. (vgl. [11], S. 1110)

In Abbildung 3.16 sind Versuchsergebnisse für NPM und PRPM mit 100 Hz Pulsfrequenz und verschiedenen Tastverhältnissen dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass der Lochdurchmesser an der Oberseite des Einstichlochs bei PRPM-Einstichen deutlich kleiner ist als bei NPM-Einstichen. Außerdem wirkt sich die Erhöhung der (Spitzen-)Leistung bei PRPM-Einstichen weniger stark auf den Einstichdurchmesser an der Oberseite aus. Eine wichtige Erkenntnis ist, dass ein zehnpromtentes Tastverhältnis in jedem Fall die Einstichlöcher mit dem kleinsten Durchmesser erzeugt.

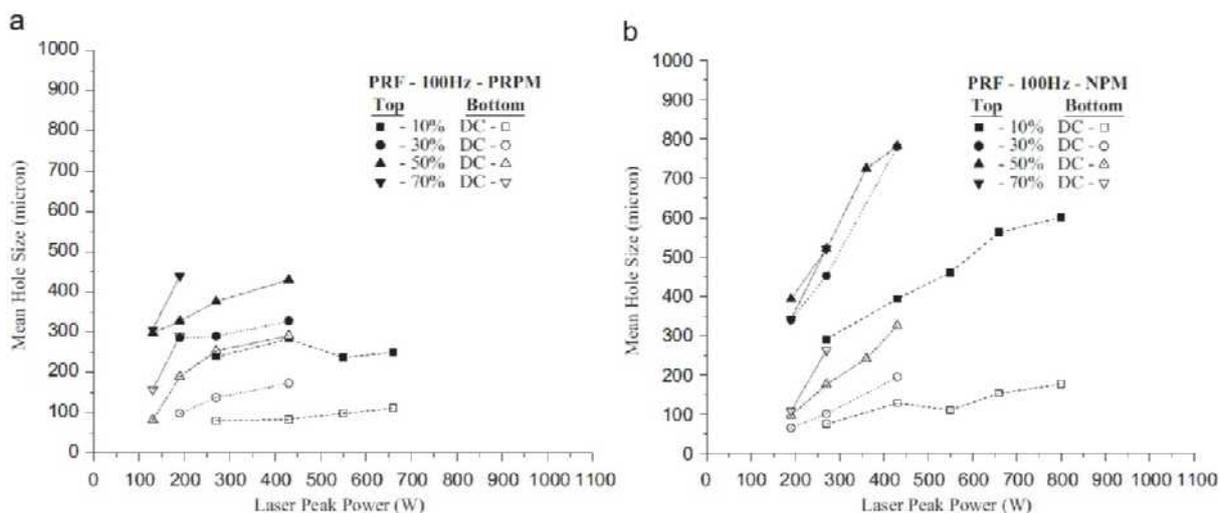


Fig. 6. Variation of pierced hole mean size with pulse peak power at 100 Hz PRF, in PRPM (a) and in NPM (b).

Abbildung 3.16.: (vgl. [11], S. 1113). Vergleich NPM und PRPM bei 100 Hz Pulsfrequenz

Eine andere Arbeit befasst sich mit der Schmelzbaddynamik bei Einstichen in 10 mm starken Edelstahl sowie der Abhängigkeit der Einstichzeit von unterschiedlichen Tastverhältnissen. Der verwendete Laser ist ein Ytterbium Faserlaser mit etwa 3700 W Spitzenleistung. Das Prozessgas ist Stickstoff mit 6 bar Druck, das aus einer 3 mm Düse mit 6 mm Standoff strömt. Der Fokus des Laserstrahls liegt dabei 5 mm unter der Oberfläche der Probe. Eine Hochgeschwindigkeitskamera wird verwendet, um die Einstichzeit zu messen. In Abbildung 3.17 ist die Einstichzeit („Piercing time“) über der Einschaltzeit, bzw. Pulsbreite („Laser on time“) bei einer Ausschaltzeit von 1 ms aufgetragen.

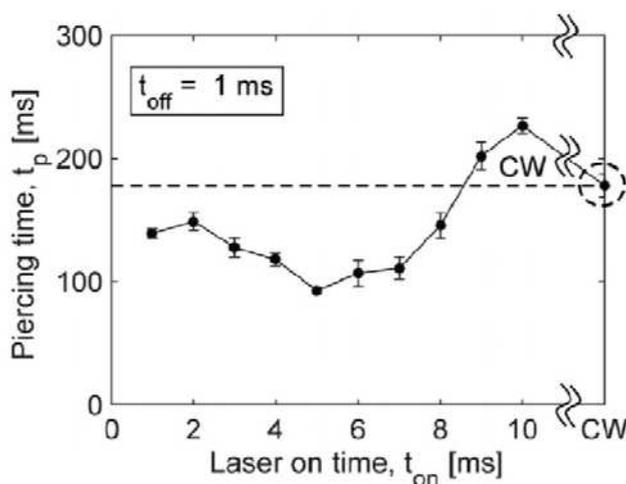


Abbildung 3.17.: (vgl. [8], S. 6). Zusammenhang zwischen Einschaltzeit und Einstichzeit

Gut erkennbar ist das Minimum bei 5 ms Einschaltzeit, das einem Tastverhältnis von 83 % entspricht. Mittels Hochgeschwindigkeitskamera fand man heraus, dass die Einschaltzeit der gepulsten Laserstrahlung einen Einfluss auf die Schmelzbaddynamik hat. Das Tastverhältnis

muss so gewählt werden, dass die Schmelze in den Pulspausen Zeit hat, sich im entstandenen Krater im Material zu sammeln. Ein neuerlicher Puls bringt dann das geschmolzene Material dazu, an den Rändern des Einstichkraters herausgeschleudert zu werden. Wird das Tastverhältnis zu klein gewählt, erstarrt die Schmelze und muss neuerlich aufgeschmolzen werden, was wiederum zu längeren Einstichzeiten führt. Wird das Tastverhältnis groß gemacht, also die Einschaltzeit im Vergleich zur Pulspause stark vergrößert, reagiert die Schmelze weniger stark auf die kurzen Pulspausen. Die oben beschriebene Schmelzbaddynamik wird nicht mehr ausgenutzt. (vgl. [8], S. 3ff) In Abbildung 3.18 ist der Durchmesser des Einstichs auf der Oberseite über der Einschaltzeit aufgetragen.

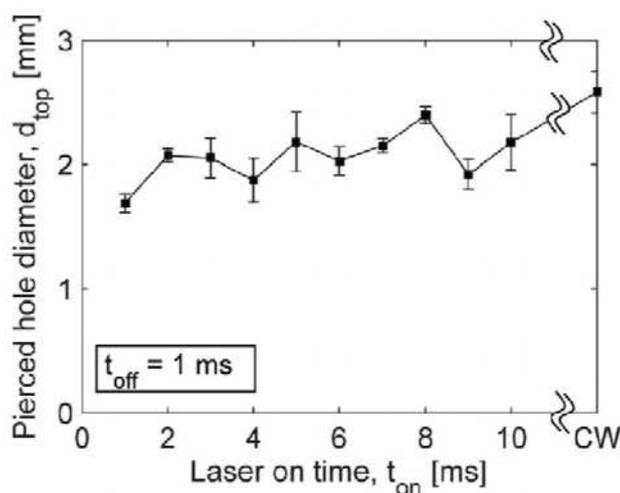


Abbildung 3.18.: (vgl. [8], S. 7). Zusammenhang zwischen Einschaltzeit und Einstichdurchmesser

Der Durchmesser an der Oberseite des Einstichs scheint nicht signifikant größer zu werden mit steigender Einschaltzeit. (vgl. [8], S. 7)

3.4. Versuchsmaterial, Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist gleich dem Aufbau, mit dem im üblichen Laborbetrieb geschnitten wird. Die Bleche werden in einer Spannvorrichtung eingeklemmt, die auf der x-Achse montiert ist. Die y- und z-Achse sind in Portalbauweise ausgeführt. Es können getrennt voneinander Stickstoff und Sauerstoff geschaltet und der Druck manuell eingestellt werden. Der Druck des Gasstrahls wird am Eingang zur Fokussieroptik abgenommen und kann an einem Manometer abgelesen werden. Der Gasstrahl (Stickstoff oder Sauerstoff) dient sowohl zum Schutz der Fokussierlinse, als auch als „Schneidgas“. Unter der y-Achse liegt der Absorber, ein etwa 120 mm x 120 mm x 1200 mm großer Raum, an dem eine Absaugung angeschlossen ist. Folgende Geräte befinden sich im Standardaufbau der Anlage:

Bezeichnung	Modell	Hersteller
CO ₂ -Laser	DC015 (1,5 kW)	Rofin
Fokussieroptik	-	Precitec
CNC-Verfahrenanlage	-	Eigenbau
Spannvorrichtung	-	Eigenbau
Absorber	-	Eigenbau
Absaugung (Stähle)	-	Bauseitig
Absaugung (Leichtmetalle)	DS 1220 H	Ruwac
Spiegelkühler	VWK 7/1	Hyfra

Tabelle 3.3.: Übersicht der Geräte des standardmäßigen Aufbaus

Der gesamte Aufbau ist in Aluminiumprofilbauweise ausgeführt (siehe Abb. [3.19](#)).

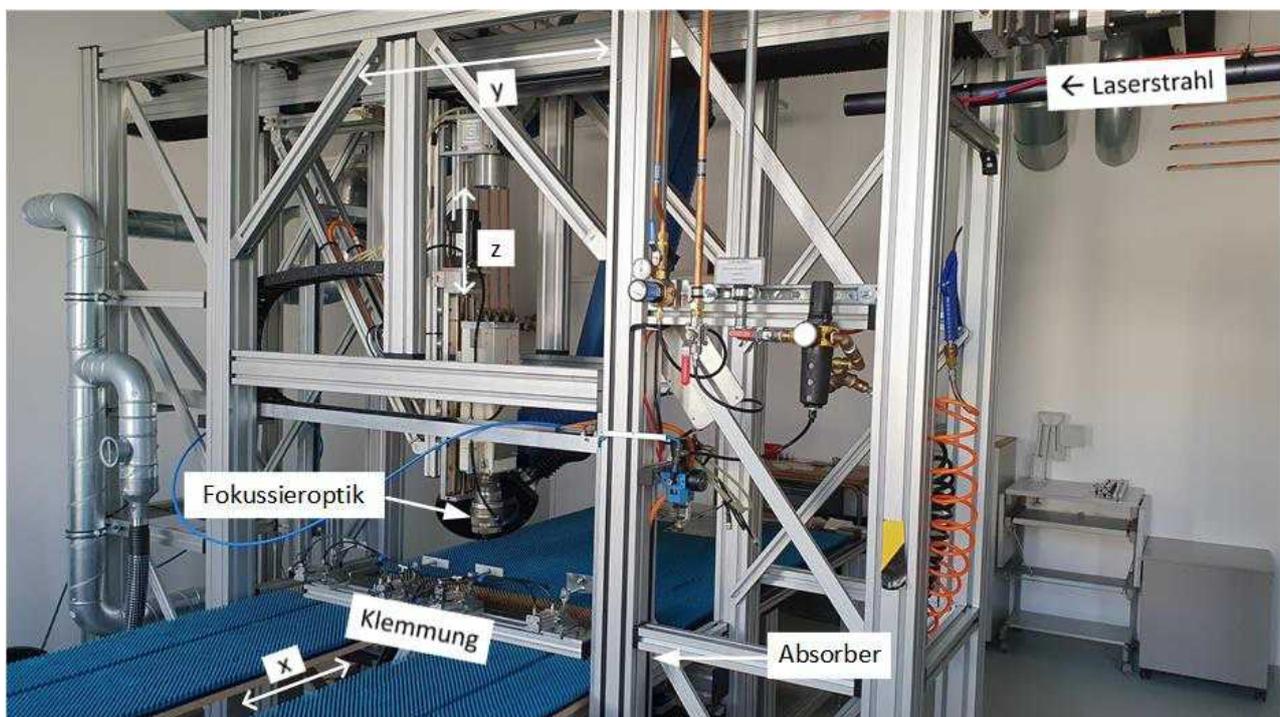


Abbildung 3.19.: CNC-Schneidanlage im Labor des Instituts

Mit folgenden Materialien werden Einstich- und Schnittversuche gemacht:

Material (gem. DIN EN 10027)	Stärke
Edelstahl (1.4307)	1 mm
Edelstahl (1.4307)	2 mm
Baustahl	6 mm
Aluminium	3 mm

Tabelle 3.4.: Übersicht der Materialien, mit denen Einstichversuche gemacht werden

Material (gem. DIN EN 10027)	Stärke	Bemerkung
Edelstahl (1.4307)	1 mm	-
Edelstahl (1.4307)	2 mm	mit und ohne abgezogener Schutzfolie

Tabelle 3.5.: Übersicht der Materialien, mit denen Schnittversuche gemacht werden

3.5. Versuchsablauf

Um eine saubere Versuchsdurchführung zu gewährleisten, wird vor jeder Versuchsreihe das Prozessgas auf korrekten Druck in der Bearbeitungsoptik überprüft. Dazu wird das jeweilige Gas manuell geschaltet und der anliegende Druck von einem Manometer an der Bearbeitungsoptik abgelesen. Außerdem wird auf eine ebene Einspannung der Proben geachtet, um den Abstand und den Winkel zwischen Probe und Düse konstant zu halten.

Um die optimalen Parameter für Einstiche zu finden, wird der Laser erst im CW-Betrieb betrieben und die eingebrachte Laserenergie über die Laserleistung und die „Burst-Zeit“, mit dem Ziel die minimale Einstichenergie zu finden, variiert. Die Startwerte der Parameter für Schnittversuche orientieren sich an einem alten Internet-Ausdruck der Firma PRC Laser (vgl. [10](#)).

Bei den angewandten Parametern werden fixe und variable Parameter unterschieden, wobei fixe Parameter immer für zumindest eine Versuchsreihe unverändert bleiben (z.B. Versuch 1.1 - 1.7). Variable Parameter werden innerhalb einer Versuchsreihe verändert. Alle angewandten Parameter werden in Tabellenform dargestellt. Folgende Parameter werden berücksichtigt:

Parameter	Anmerkung
Probe #	Gibt die Nummer der Probe in folgender Art an: <Versuchsreihe>.<Versuch>
P	eingestellte Laserleistung in Watt
Tastverh.	Tastverhältnis in Prozent oder Continuous Wave (CW)
Freq.	Pulsfrequenz des Lasers in Hertz
Burst	Pulszeit bei Einstichen in Millisekunden
Fokuslage	Abstand des Fokus von der Blechoberseite (z_F)
Standoff	Abstand der Düse von der Blechoberseite (z_D)
Düsen \varnothing	-
p-Gas	Druck des Prozessgases vor der Düse in bar
eingebraachte, (summierte) Laserenergie	Produkt aus Laserleistung, „Burstzeit“ und Tastverhältnis in Joule. Theoretischer Wert, berücksichtigt keine Absorption, Reflexion oder Transmission am Metall.

Tabelle 3.6.: Übersicht über die für die Versuche relevanten Parameter

3.6. Versuchsergebnisse

Alle Versuchsergebnisse werden in eine Excel-Datei eingetragen. Die Versuche, aus denen sich eine Erkenntnis ableiten lässt, werden hier angeführt. Abgebrochen werden Einstechversuche mit einem Material immer dann, wenn der Durchmesser des Einstichs kleiner oder gleich der Schnittspaltbreite in diesem Material ist und die Qualität zufriedenstellend ist. Bei Materialien, zu denen es keine Schnittversuche gibt, werden die Versuche immer dann abgebrochen, wenn abzusehen ist, dass keine weitere Reduktion der Energieeinbringung mehr möglich ist, bzw. die Qualität zufriedenstellend ist. Die Ergebnisse der Versuche werden unter dem Mikroskop bei vierfacher Vergrößerung untersucht und fotografiert.

3.6.1. Einstiche in 1 mm 1.4307

Für den Einstich in einen Millimeter starkes Edelstahlblech sind grundsätzlich große Leistungsreserven des Lasers und des Gasstromes zu erwarten. Das Ziel ist, einen möglichst sauberen Einstich (wenig rekristallisierte Schmelze), bei möglichst geringem Energieeintrag, zu erreichen. Der Düsendurchmesser wird bewusst groß gewählt, um Oxidation auf der Oberseite der Proben zu verhindern. Es wird Stickstoff als Prozessgas verwendet. Dabei werden folgende Parameter für erste Versuche nicht verändert:

Probe #	Tastverh.	Freq.	Burst	Fokusbilge	Standoff	Düsen \varnothing	p-Gas
1.1 - 1.7	CW	CW	400 ms	-0,5 mm	1 mm	2 mm	10 bar

Tabelle 3.7.: Fixe Parameter, Proben 1.1 bis 1.7, 1 mm 1.4307

Um die minimal erforderliche Leistung zum Einstechen zu ermitteln, wird schrittweise die Leistung reduziert.

Probe #	P	eingebraachte Laserenergie
1.1 - 1.7	1500 W - 300 W	600 J - 120 J

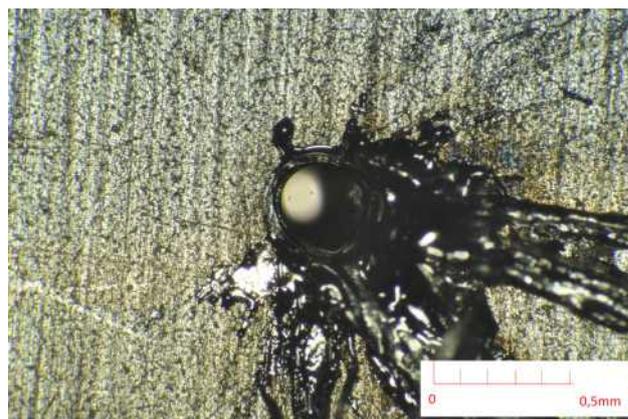
Tabelle 3.8.: Variable Parameter, Proben 1.1 bis 1.7, 1 mm 1.4307

Deutlich zu erkennen ist eine starke Verfärbung auf der Unterseite der Probe 1.1 (siehe Abb. [3.20](#)).



Abbildung 3.20.: Probe 1.1, Unterseite, 1 mm 1.4307

Diese kann reduziert werden, indem die in die Probe eingebrachte Energie, reduziert wird. Der Durchmesser auf der Unterseite der Probe beträgt etwa 0,2mm. Auf der Oberseite der Proben 1.1 - 1.7 ist rekristallisierte Schmelze zu erkennen, wobei diese bei kleinerer Leistung geringer ausgeprägt ist (siehe Abb. [3.21](#) und Abb. [3.22](#)). Die Durchmesser auf der Oberseite der Proben betragen 0,4 mm bei Probe 1.1 und 0,2 mm bei Probe 1.7.

Abbildung 3.21.: Probe 1.1, Oberseite, 1mm
1.4307Abbildung 3.22.: Probe 1.7, Oberseite, 1 mm
1.4307

Um diese Metallspritzer zu reduzieren, wird der Gasdruck von zehn auf acht Bar reduziert.

Probe #	Tastverh.	Freq.	Burst	Fokuslage	Standoff	Düsen \varnothing	p-Gas
2.1 - 2.7	CW	CW	400 ms	-0,5 mm	1 mm	2 mm	8 bar

Tabelle 3.9.: Fixe Parameter, Proben 2.1 bis 2.7, 1 mm 1.4307

Außerdem wird die Leistung reduziert um die Verfärbung auf der Unterseite weiter zu reduzieren.

Probe #	P	eingebrachte Laserenergie
2.1 - 2.7	300 W - 180 W	120 J - 72 J

Tabelle 3.10.: Variable Parameter, Proben 2.1 bis 2.7, 1 mm 1.4307

Bei den Proben 2.5 bis 2.7 ist der Einstich nicht vollständig, der Durchgang von Ober- zu Unterseite ist nicht gegeben. Demnach kann für die fixen Parameter in Tabelle 3.9, die eingebrachte Laserenergie von 96 Joule als untere Grenze gesehen werden (Probe 2.4). Der Durchmesser des Einstichs an der Oberseite beträgt in etwa 0,2 mm und weist große Gebiete rekristallisierter Schmelze auf (siehe Abb. 3.23). Die Oxidation an der Unterseite konnte durch die Reduzierung der in die Probe eingebrachten Energie nicht reduziert werden (siehe Abb. 3.24).

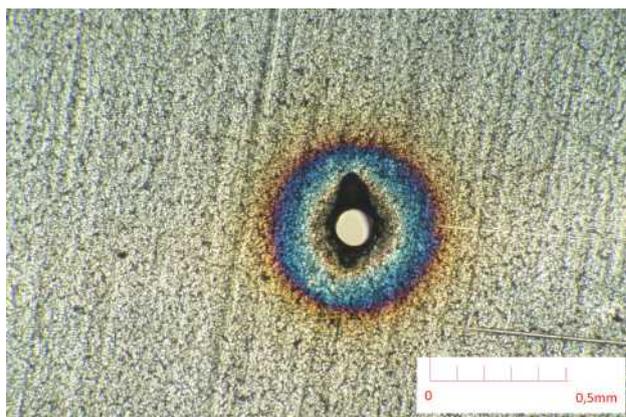
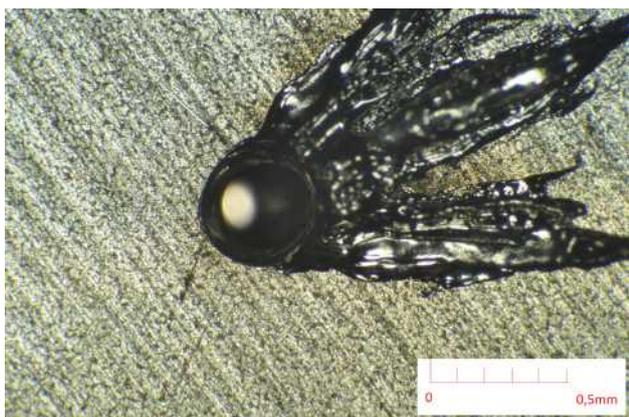


Abbildung 3.23.: Probe 2.4, Oberseite, 1 mm 1.4307

Abbildung 3.24.: Probe 2.4, Unterseite, 1 mm 1.4307

Um die Gebiete rekristallisierter Schmelze kleiner zu machen, wird bei den Proben 4.1 bis 6.7 mit gepulster Laserstrahlung und unterschiedlichen Pulsfrequenzen experimentiert (siehe Tab. [3.11](#)).

Probe #	Freq.	Burst	Fokusslage	Standoff	Düsen \varnothing	p-Gas
3.1 - 3.7	5000 Hz	400 ms	-0,5 mm	1 mm	2 mm	8 bar
4.1 - 4.7	500 Hz	400 ms	-0,5 mm	1 mm	2 mm	8 bar
5.1 - 5.7	100 Hz	400 ms	-0,5 mm	1 mm	2 mm	8 bar
6.1 - 6.7	10 Hz	400 ms	-0,5 mm	1 mm	2 mm	8 bar

Tabelle 3.11.: Fixe Parameter, Proben 3.1 bis 6.7, 1 mm 1.4307

Dabei wird das Tastverhältnis variiert (siehe Tab. [3.12](#)).

Probe #	Tastverh.	eingebrachte Laserenergie
3.1 - 3.7	80 % - 20 %	480 J - 120 J
4.1 - 4.7	80 % - 20 %	480 J - 120 J
5.1 - 5.7	80 % - 10 %	480 J - 60 J
6.1 - 6.7	80 % - 10 %	480 J - 60 J

Tabelle 3.12.: Variable Parameter, Proben 3.1 bis 6.7, 1 mm 1.4307

Alle Proben weisen Gebiete mit rekristallisierter Schmelze auf der Oberseite auf, wobei sich die Größe nicht mit dem Tastverhältnis ändert. Die Oxidation an der Probenunterseite ist bereits bei einem Tastverhältnis von 80 % deutlich kleiner als bei Proben, in die mit CW-Laserstrahlung eingestochen wurde, wobei die Verfärbung bei Probe 5.7 die geringste Ausprägung aufweist (siehe Abb. [3.25](#)).



Abbildung 3.25.: Probe 5.7, Unterseite, 1 mm 1.4307

Vergleicht man beispielsweise die Proben 1.1 und 2.4 miteinander, kann darauf geschlossen werden, dass eine kleinere eingebrachte Laserenergie zu kleineren Einstichdurchmessern führt. Durch den kleineren Einstichdurchmesser wird weniger Material aufgeschmolzen. Die Gebiete mit rekristallisierter Schmelze werden bei gleicher Pulsdauer, mit abnehmender Leistung, kleiner. Demnach sollte eine Kombination aus geringer Leistung und gepulster Laserstrahlung zum gewünschten Ergebnis führen. Bei den Versuchen 7.1 - 7.7 wird die Leistung auf 1000 W reduziert und eine Pulsfrequenz von 100 Hz gewählt (selbe Pulsfrequenz wie Proben 5.1 - 5.7).

Probe #	P	Freq.	Burst	Fokusbildung	Standoff	Düsen \varnothing	p-Gas
7.1 - 7.7	1000 W	100 Hz	400 ms	-0,5 mm	1 mm	2 mm	8 bar

Tabelle 3.13.: Fixe Parameter, Proben 7.1 bis 7.7, 1 mm 1.4307

Das Tastverhältnis wird schrittweise reduziert (siehe Tab. [3.14](#)).

Probe #	Tastverh.	eingebrachte Laserenergie
7.1 - 7.7	80 % - 10 %	320 J - 40 J

Tabelle 3.14.: Variable Parameter, Proben 7.1 bis 7.7, 1 mm 1.4307

Die Menge an rekristallisierter Schmelze, im Vergleich zu den Versuchen mit gepulster Strahlung und 1500 W Leistung, ist kaum kleiner geworden. Die Oxidation auf der Unterseite ist bei Probe 7.7 mit 10 % Tastverhältnis eindeutig am geringsten ausgeprägt (siehe Abb. [3.26](#)).



Abbildung 3.26.: Probe 7.7, Unterseite, 1 mm 1.4307

Aus diesem Grund werden bei den Versuchen 8.1 - 9.7 folgende fixe Parameter gewählt:

Probe #	Tastverh.	Freq.	Burst	Fokusbildung	Standoff	Düsen \varnothing	p-Gas
8.1 - 9.7	10 %	100 Hz	400 ms	-0,5 mm	1 mm	2 mm	8 bar

Tabelle 3.15.: Fixe Parameter, Proben 7.1 bis 7.7, 1 mm 1.4307

Die Leistung wird in 50 Watt-Schritten reduziert, um eine untere Schwelle zu finden, bei der kein Durchstich mehr möglich ist (siehe Tab. 3.16).

Probe #	P	eingebrachte Laserenergie
8.1 - 9.7	950 W - 300 W	38 J - 12 J

Tabelle 3.16.: Variable Parameter, Proben 8.1 bis 9.7, 1 mm 1.4307

Die minimal mögliche Leistung für einen sauberen Einstich bei gegebenen Parametern (siehe Tab. 3.15) beträgt 400 Watt. Das Gebiet mit rekristallisierter Schmelze an der Probenoberseite ist kleiner als bei vorangegangenen Versuchen (siehe Abb. 3.27). Die Oxidation auf der Probenunterseite ist äußerst gering ausgeprägt (siehe Abb. 3.28). Der Durchmesser an der Probenoberseite beträgt knapp unter 0,2 mm. Der Durchmesser an der Probenunterseite knapp über 0,1 mm.

Abbildung 3.27.: Probe 9.5, Oberseite, 1 mm
1.4307Abbildung 3.28.: Probe 9.5, Unterseite, 1 mm
1.4307

Zusammenfassend können folgende Parameter für den optimalen Einstich gefunden werden:

Probe #	P	Tastverh.	Freq.	Burst	Fokuslage	Standoff	Düsen \varnothing	p-Gas
9.5	400 W	10 %	100 Hz	400 ms	-0,5 mm	1 mm	2 mm	8 bar

Tabelle 3.17.: Optimale Parameter, Einstich in 1 mm 1.4307

Die aufzuwendende Minimalleistung im Pulsbetrieb mit 100 Hz ist logischerweise höher, als im CW-Betrieb. Die einzubringende Energie ist hingegen deutlich geringer (siehe Tab. 3.18).

Probe #	P	Tastverh.	Freq.	eingebrachte Laserenergie
2.4	240 W	CW	CW	96 J
9.5	400 W	10 %	100 Hz	16 J

Tabelle 3.18.: Vergleich der minimalen Einstichleistungen, 1 mm 1.4307

3.6.2. Schnitte in 1 mm 1.4307

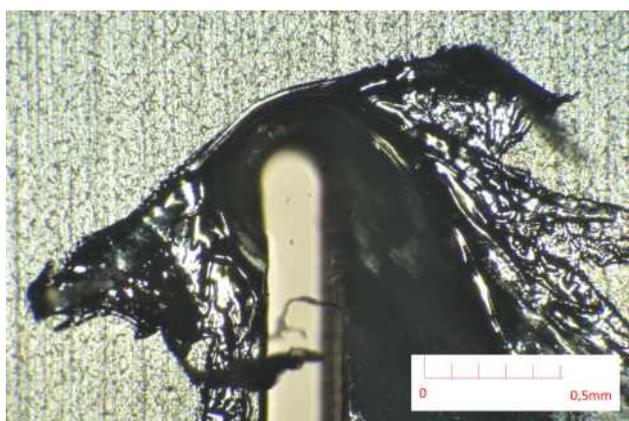
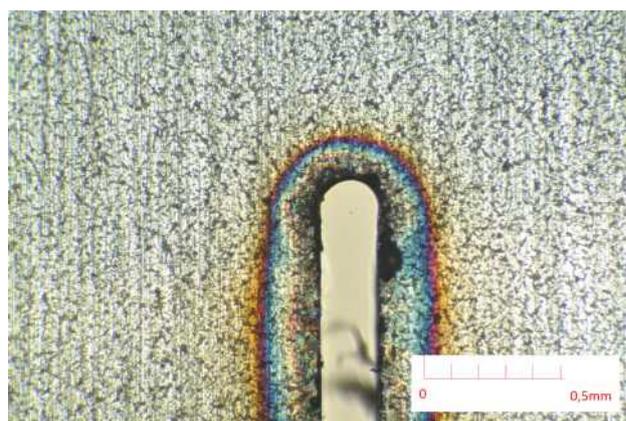
Um zu prüfen, ob Einstiche tatsächlich entlang des Konturschnitts gemacht werden können, muss überprüft werden, ob der Durchmesser des Einstichs klein genug ist. Laut oben definiertem Kriterium darf der Durchmesser des Einstichs maximal die Größe des Schnittspaltes haben. Anders als bei den Einstichversuchen dürfen nur Parameter verändert werden, die nicht manuell am Bearbeitungskopf geändert werden müssen. Andernfalls würden auch Einstichparameter geändert werden. Parameter wie die Fokuslage können nicht für Einstich und Schnitt separat gewählt werden, da diese manuell geändert werden müssen. Einzig die Schnittgeschwindigkeit kann sinnvollerweise angepasst werden. [10] gibt eine Schnittgeschwindigkeit von $4000 \frac{mm}{min}$ an.

Versuche mit anderen Schnittgeschwindigkeiten zeigen, dass keine Verbesserung, hinsichtlich

der Schnittqualität, möglich ist. Der Einstich ist an der Oberseite der Probe größer als der Schnittpalt (siehe Abb. 3.29). An der Unterseite hat der Einstich denselben Durchmesser wie der Schnittpalt breit ist (siehe Abb. 3.30). Dadurch, dass die Parameter des Einstichs bereits auf minimale Energieeinbringung optimiert wurden, ist durch andere Einstich-Parameter keine Verkleinerung des Einstichs zu erwarten.

P	Tastverh.	Freq.	Vorschub	Fokuslage	Standoff	Düsen \varnothing	p-Gas
1500 W	CW	CW	4000 $\frac{mm}{min}$	-0,5 mm	1 mm	2 mm	8 bar

Tabelle 3.19.: Optimale Parameter, Schnitte in 1 mm 1.4307

Abbildung 3.29.: Schnitt mit 4000 $\frac{mm}{min}$ Schnittgeschwindigkeit, Oberseite, 1 mm 1.4307Abbildung 3.30.: Schnitt mit 4000 $\frac{mm}{min}$ Schnittgeschwindigkeit, Unterseite, 1 mm 1.4307

3.6.3. Einstiche in 2 mm 1.4307

In einem ersten Schritt wird die minimal erforderliche Leistung bei einer „Burstzeit“ von 400 ms im CW-Betrieb ermittelt. Folgende Parameter werden für die Versuche 1.1 - 1.7 nicht verändert:

Probe #	Tastverh.	Freq.	Burst	Fokuslage	Standoff	Düsen \varnothing	p-Gas
1.1 - 1.7	CW	CW	400 ms	-1,5 mm	1 mm	2 mm	10 bar

Tabelle 3.20.: Fixe Parameter, Proben 1.1 bis 1.7, 2 mm 1.4307

Die Leistung wird schrittweise reduziert, wobei die minimale Einstichleistung bei 400 ms „Burstzeit“ 300 W beträgt (siehe Tab. 3.21, Probe 1.5). Das entspricht einer eingebrachten Energie von 120 J.

Probe #	P	eingebrachte Laserenergie	Durchgestochen?
1.1 - 1.5	1500 W - 300 W	600 J - 120 J	Ja
1.6 - 1.7	250 W - 200 W	100 J - 80 J	Nein

Tabelle 3.21.: Variable Parameter, Proben 1.1 bis 1.7, 2 mm 1.4307

Der Einstich an der Oberseite von Probe 1.5 ist ellipsenförmig und misst etwa 2 mm x 0,6 mm. Außerdem ist die oxidierte Zone an der Unterseite des Einstichs mit etwa 1 mm Durchmesser deutlich größer als bei Einstichen in 1mm starkes 1.4307 (siehe Abb. 3.31 und 3.32).

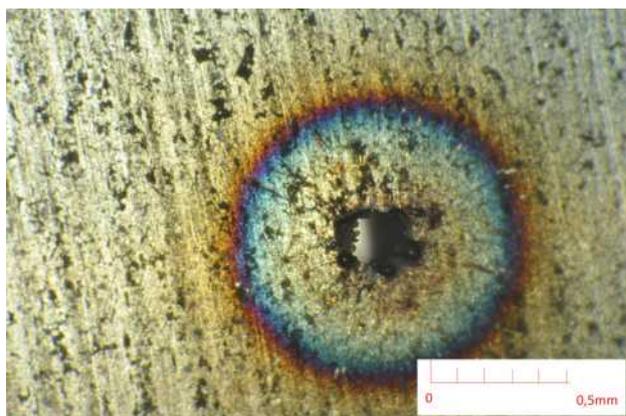
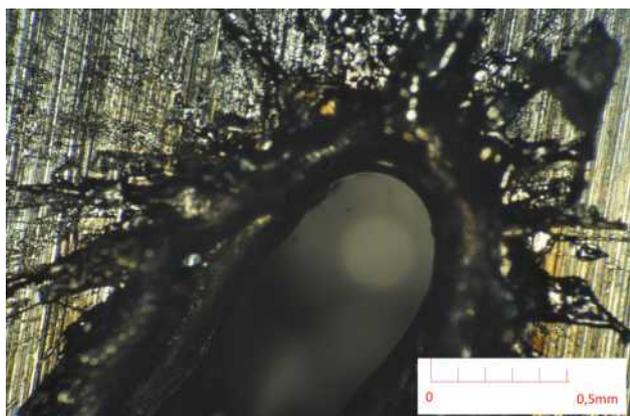


Abbildung 3.31.: Probe 1.5, Oberseite, 2 mm 1.4307

Abbildung 3.32.: Probe 1.5, Unterseite, 2 mm 1.4307

Das Ziel ist nun, geeignete Pulsparameter zu finden um die Qualität des Einstichs hinsichtlich des Durchmessers auf der Vorderseite und Oxidation auf der Rückseite zu verbessern. Dazu werden Versuche mit 1500 W Leistung und unterschiedlichen Pulsfrequenzen und Tastverhältnissen gemacht (siehe Tab. 3.22).

Probe #	P	Freq.	Burst	Fokusslage	Standoff	Düsen Ø	p-Gas
2.1 - 2.7	1500 W	5000 Hz	400 ms	-1,5 mm	1 mm	2 mm	10 bar
3.1 - 3.7	1500 W	500 Hz	400 ms	-1,5 mm	1 mm	2 mm	10 bar
4.1 - 4.7	1500 W	100 Hz	400 ms	-1,5 mm	1 mm	2 mm	10 bar

Tabelle 3.22.: Fixe Parameter, Proben 2.1 bis 4.7, 2 mm 1.4307

Der variable Parameter bei den Versuchen 2.1 - 4.7 ist das Tastverhältnis.

Probe #	Tastverh.	eingebrachte Laserenergie
2.1 - 4.7	80 % - 20 %	1200 J - 300 J

Tabelle 3.23.: Variable Parameter, Proben 2.1 bis 4.7, 2 mm 1.4307

Die Durchmesser an den Oberseiten der Einstichstellen sind bei den Versuchen mit 100 Hz am kleinsten, jedoch ähnlich groß wie bei Versuchen mit CW-Strahlung. Daher werden Versuche mit geringerer Leistung und gepulster Laserstrahlung gemacht (1000 W, 800 W, 500 W und 300 W).

Probe #	P	Freq.	Burst	Fokuslage	Standoff	Düsen \varnothing	p-Gas
5.1 - 5.7	1000 W	100 Hz	400 ms	-1,5 mm	1 mm	2 mm	10 bar
6.1 - 6.7	800 W	100 Hz	400 ms	-1,5 mm	1 mm	2 mm	10 bar
7.1 - 7.7	500 W	100 Hz	400 ms	-1,5 mm	1 mm	2 mm	10 bar
8.1 - 8.7	300 W	100 Hz	400 ms	-1,5 mm	1 mm	2 mm	10 bar

Tabelle 3.24.: Fixe Parameter, Proben 5.1 bis 8.7, 2 mm 1.4307

Die Tastverhältnisse liegen zwischen 80 % und 20 % (siehe Tab. [3.25](#)).

Probe #	Tastverh.	eingebrachte Laserenergie
5.1 - 5.7	80 % - 20 %	320 J - 80 J
6.1 - 6.7	80 % - 20 %	256 J - 64 J
7.1 - 7.7	80 % - 20 %	160 J - 40 J
8.1 - 8.7	80 % - 20 %	96 J - 24 J

Tabelle 3.25.: Variable Parameter, Proben 5.1 bis 8.7, 2 mm 1.4307

Die Proben 8.1 bis 8.7 zeigen, dass bei 300 W kein Einstich mehr möglich ist. Um den Effekt der gepulsten Laserstrahlung bestmöglich zu nutzen, wird mit kleinen Tastverhältnissen von 10, 20, 30 und 50 % weiter versucht.

Probe #	Tastverh.	Freq.	Burstzeit	Fokuslage	Standoff	Düsen \varnothing	p-Gas
9.1 - 9.7	20 %	100 Hz	400 ms	-1,5 mm	1 mm	2 mm	10 bar
10.1 - 10.7	10 %	100 Hz	400 ms	-1,5 mm	1 mm	2 mm	10 bar
11.1 - 12.7	30 %	100 Hz	400 ms	-1,5 mm	1 mm	2 mm	10 bar
13.1 - 13.7	50 %	100 Hz	400 ms	-1,5 mm	1 mm	2 mm	10 bar

Tabelle 3.26.: Fixe Parameter, Proben 9.1 bis 13.7, 2 mm 1.4307

Die Leistungen werden dabei variiert, wobei bei kleineren Tastverhältnissen tendenziell höhere Leistungen eingestellt werden, um sicher durchzustechen.

Probe #	P	eingebraachte Laserenergie
9.1 - 9.7	800 W - 500 W	64 J - 40 J
10.1 - 10.7	1500 W - 900 W	60 J - 36 J
11.1 - 12.7	1500 W - 200 W	180 J - 24 J
13.1 - 13.7	1000 W - 400 W	200 J - 80 J

Tabelle 3.27.: Variable Parameter, Proben 9.1 bis 13.7, 2 mm 1.4307

Bei den Proben 10.7, 11.7 und 13.2 werden 900 W Leistung und 400 ms „Burstzeit“ angewendet. Interessant zu sehen ist, dass die Menge an rekristallisierter Schmelze an der Oberseite der Probe 13.2 (50 % Tastverhältnis, siehe Abb. 3.35) am geringsten ist, obwohl die meiste Energie ins Material eingebracht wurde. Bei den Proben 10.7 (10 % Tastverhältnis, siehe Abb. 3.33) und 11.7 (30 % Tastverhältnis, siehe Abb. 3.34) sind größere Mengen an wieder erstarrter Schmelze zu sehen, die eine gewisse Porosität aufzuweisen scheinen. Ein Tastverhältnis von 50 % bei 100 Hz stellt einen Vorteil für die Qualität der Oberseite des Einstichs dar.

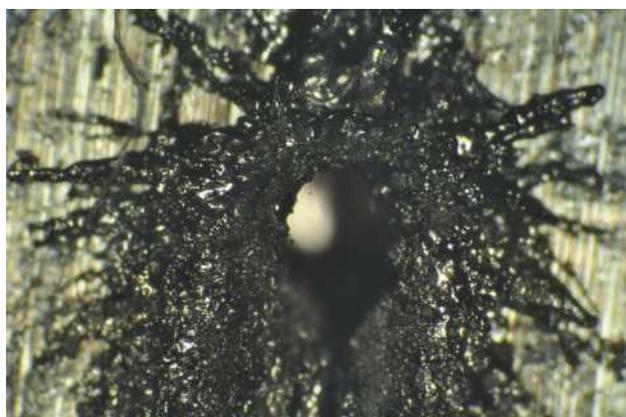
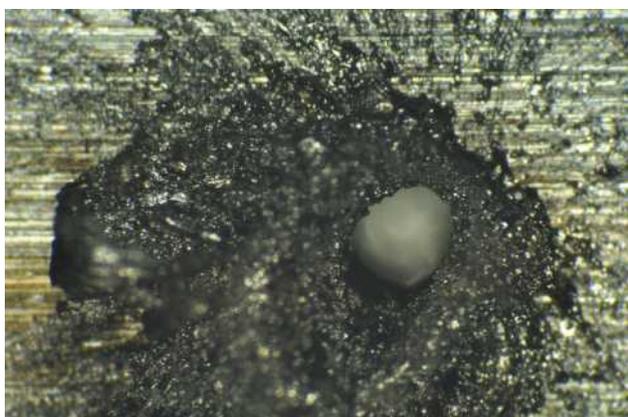


Abbildung 3.33.: Probe 10.7, Oberseite, 2 mm 1.4307

Abbildung 3.34.: Probe 11.7, Oberseite, 2 mm 1.4307

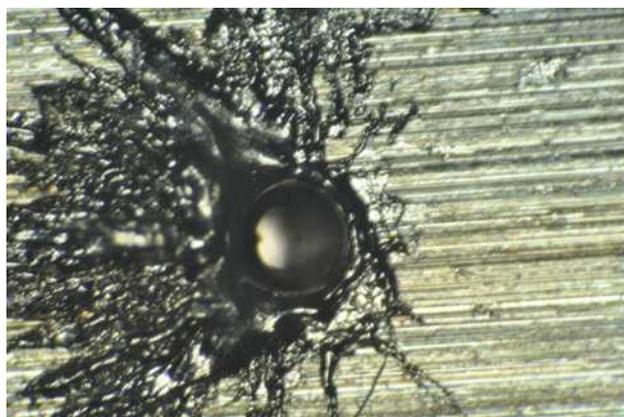


Abbildung 3.35.: Probe 13.2, Oberseite, 2 mm 1.4307

Die kleinsten Durchmesser an den Oberseiten weisen die Proben 12.1 - 12.7 auf, wobei bei 12.6 und 12.7 nicht mehr durchgestochen wurde. Als ideal erweist sich die Probe 13.6, da ein sauberer Einstich, mit geringer Menge an rekristallisierter Schmelze an der Oberseite und geringer Oxidation an der Unterseite, hergestellt werden kann (siehe Abb. 3.36 und Abb. 3.37). Die Durchmesser betragen 0,3 mm an der Oberseite und 0,15 mm an der Unterseite.

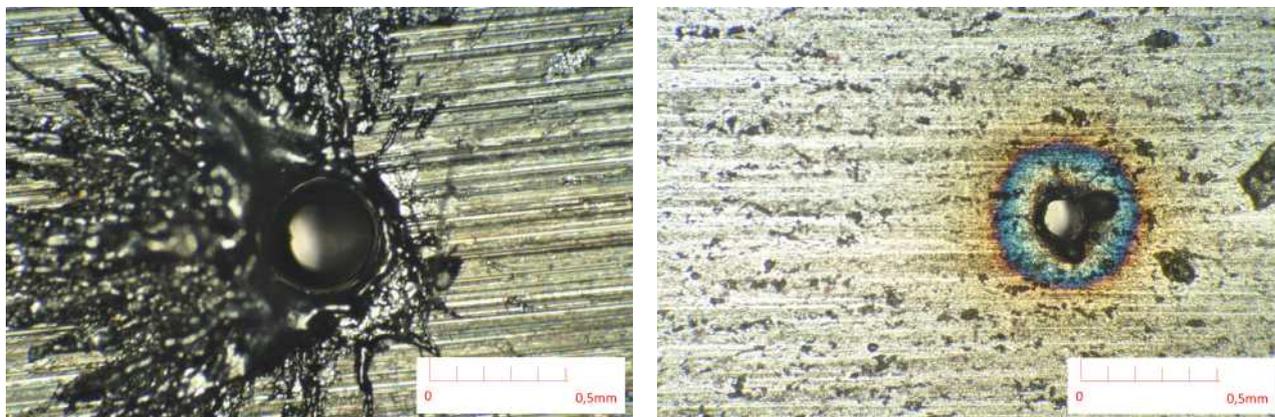


Abbildung 3.36.: Probe 13.6, Oberseite, 2 mm 1.4307

Abbildung 3.37.: Probe 13.6, Unterseite, 2 mm 1.4307

Folgende Parameter sind ideal:

Probe #	P	Tastverh.	Freq.	Burst	Fokuslage	Standoff	Düsen Ø	p-Gas
13.6	500 W	50 %	100 Hz	400 ms	-1,5 mm	1 mm	2 mm	10 bar

Tabelle 3.28.: Optimale Parameter, Einstich in 2 mm 1.4307

Vergleicht man die erforderlichen Einstichleistungen und -energien, fällt auf, dass die einzubringende Energie mit gepulster Laserstrahlung nur knapp unter der einzubringenden Energie im CW-Betrieb liegt (siehe Tab. 3.29).

Probe #	P	Tastverh.	Freq.	Burst	eingebrachte Laserenergie
1.5	300 W	CW	CW	400 ms	120 J
13.6	500 W	50 %	100 Hz	400 ms	100 J

Tabelle 3.29.: Vergleich der minimalen Einstichleistungen, 2 mm 1.4307

3.6.4. Schnitte in 2 mm 1.4307

Bei den Schnittversuchen mit 2 mm starkem Blech aus 1.4307 wird einseitig geschliffenes Blech verwendet. Das Blech ist auf der geschliffenen Seite mit einer Folie vor Beschädigung geschützt.

Die Schutzfolie befindet sich auf der Unterseite des Blechs. Die bei Schnittversuchen entstandenen Grate sind in Abbildung 3.38 zu sehen. Trotz umfangreicher Veränderung aller relevanten Parameter ist es nicht möglich gratfreie Schnitte herzustellen.

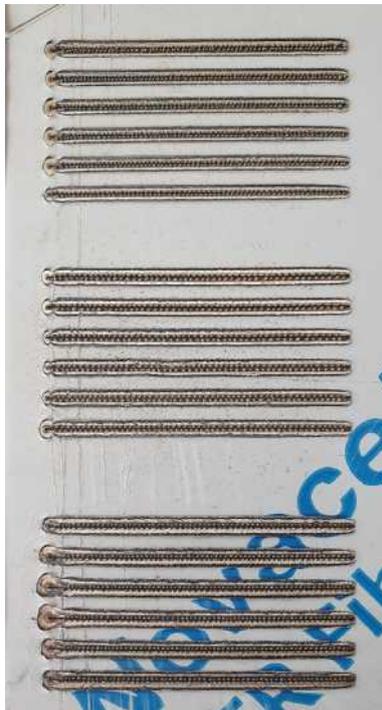


Abbildung 3.38.: Gratbildung an der Unterseite des 2 mm 1.4307 Blechs

Durch Schnitte eines Kollegen in ein anderes Blech ohne Schutzfolie wurde festgestellt, dass die Schutzfolie auf der Unterseite ein großes Problem darstellt und für einen Großteil der Gratbildung verantwortlich ist. Bei weiteren Versuchen wird das Blech um 180 Grad gedreht. Die Schutzfolie befindet sich bei diesen Schnitten auf der Oberseite des Blechs. Die resultierenden Schnitte weisen immer noch einen Grat auf, der aber nicht mehr gleichmäßig und durchgehend ist.

Um jegliche Beeinflussung durch die Schutzfolie zu vermeiden, wird diese entfernt. [10] schlägt für den Schnitt in 2 mm 1.4307 einen Düsen-Standoff von 1 mm und eine Fokuslage von -2,5 mm vor. Der Fokus liegt knapp über der Blechunterseite. Folgende fixe Parameter werden für die Schnittversuche 1.1 - 2.7 verwendet:

Probe #	P	Tastverh.	Freq.	Fokuslage	Standoff	Düsen \varnothing	p-Gas
1.1 - 2.7	1500 W	CW	CW	-1,5 mm	1 mm	2 mm	10 bar

Tabelle 3.30.: Fixe Parameter, Proben 1.1 bis 2.7, 2 mm 1.4307

Der variable Parameter in den Versuchen 1.1 - 2.7 ist die Schnittgeschwindigkeit, bzw. der Vorschub.

Probe #	Schnittgeschwindigkeit/Vorschub
1.1 - 2.7	2500 $\frac{mm}{min}$ - 1200 $\frac{mm}{min}$

Tabelle 3.31.: Variable Parameter, Proben 1.1 bis 2.7, 2 mm 1.4307

Dabei ist auffällig, dass die erste Hälfte der Schnitte gratfrei ist und dann ein ungleichmäßiger Grat an der Unterseite des Blechs entsteht (siehe Abb. 3.39).

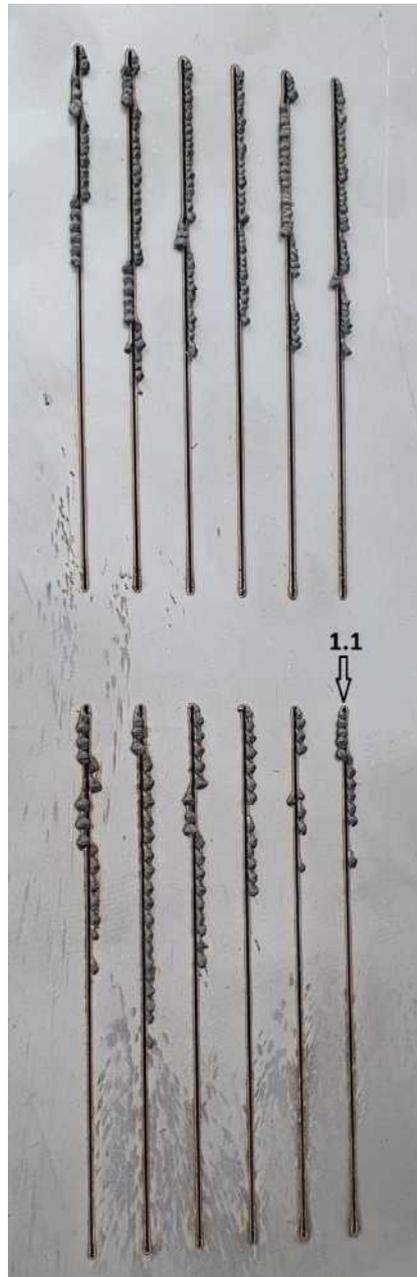


Abbildung 3.39.: Blick auf die Unterseite des Blechs, Proben 1.1-2.7

Dieser ungleichmäßige Grat ist wechselseitig, links und rechts der Schnittfuge. Den Schnitt mit dem kürzesten Grat liefert Probe 1.1, bei $2500 \frac{mm}{min}$ Schnittgeschwindigkeit. Der Beginn der Gratbildung bei Probe 1.1 ist in Abbildung 3.40 dargestellt. Der Grat hat eine große Ausdehnung in Richtung der optischen Achse des Mikroskops. Durch die fehlende Tiefenschärfe ist der Grat nur verschwommen zu sehen. Deutlich zu erkennen ist die klare Abgrenzung zur Blechunterseite.

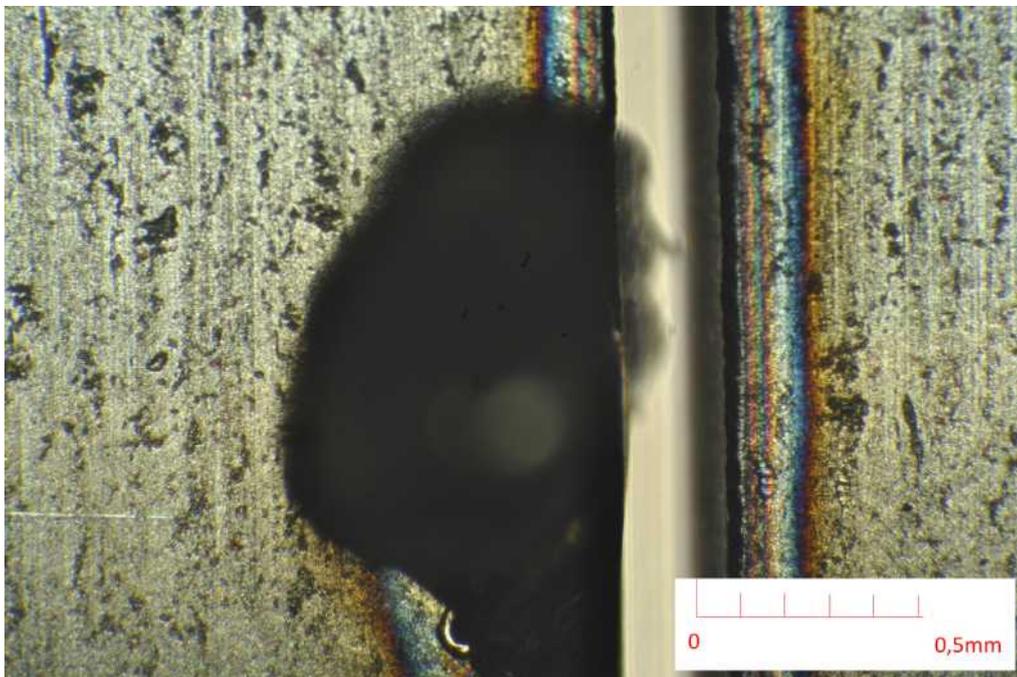


Abbildung 3.40.: Beginn der Gratbildung bei Probe 1.1, 2 mm 1.4307

Eine mögliche Ursache der Gratbildung in der zweiten Hälfte des Schnitts ist die zunehmende Verschmutzung der Fuge zum Absorber (siehe Abb. 3.41). Beim Schnitt durch das Metall bleibt ein Teil der flüssigen Schmelze, die nach unten ausgeblasen wird, an der Fuge des Strahlabsorbers hängen. Diese Anlagerungen werden so groß, dass sie zum Teil das gerade bearbeitete Blech an der Unterseite berühren. Ist die Verschmutzung so groß, dass die aktuelle Schnittfront beeinflusst wird, besteht die Möglichkeit, dass die Schmelze nicht mehr sauber ausgeblasen werden kann.

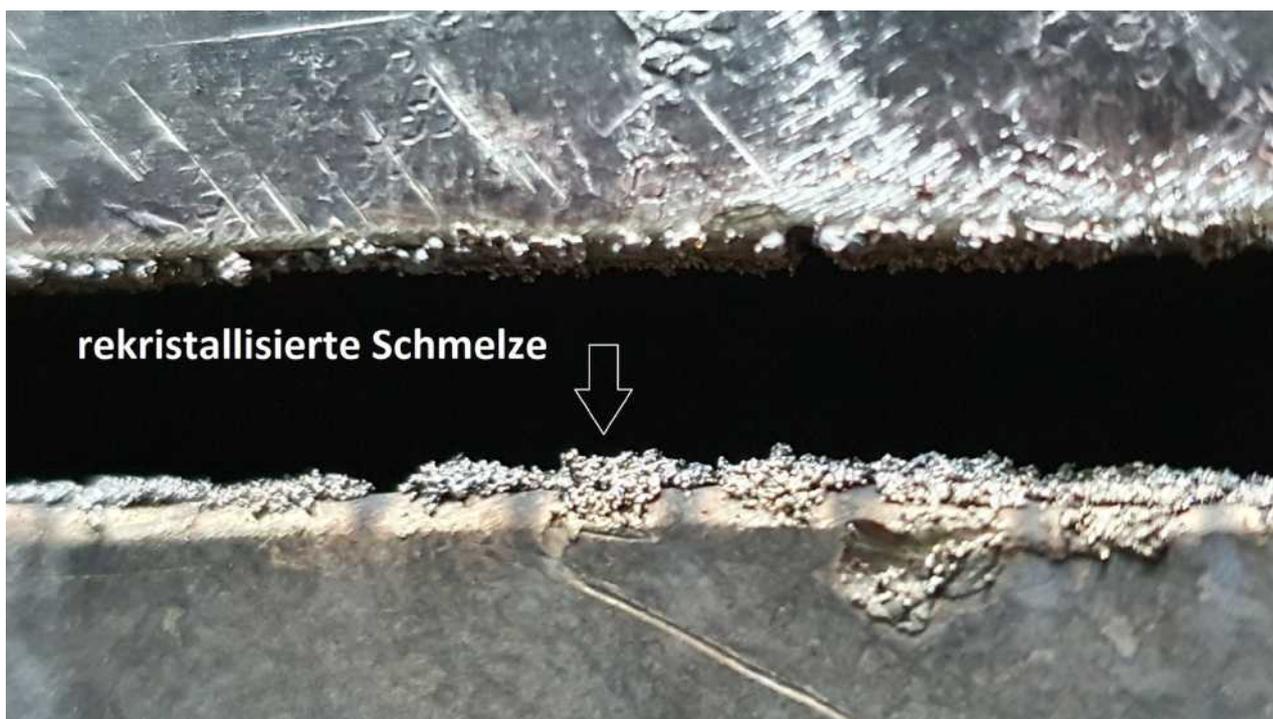


Abbildung 3.41.: Blick von oben in die Fuge des Strahlabsorbers mit rekristallisierter Schmelze

Der Strahlabsorber ist notwendig, um Laserstrahlung unter dem gerade bearbeiteten Blech zu absorbieren. Eine angeschlossene Absaugung dient dazu gefährlichen Staub und Dämpfe, die beim Schneiden von Metallen und Kunststoffen entstehen können, effizient abführen zu können. Außerdem muss das Blech auf einer ebenen Oberfläche aufliegen, um nicht unter dem Druck des Gasstrahls nachzugeben. Daher kann der Absorber im regulären Laborbetrieb nicht entfernt werden. Um dennoch eine Beeinflussung der Schnittqualität durch den Strahlabsorber nachweisen zu können, wird ein Versuchsaufbau gemacht, bei dem sehr viel freies Volumen unter dem gerade geschnittenen Blech ist. In einem ersten Schritt wird ein Blechstreifen in einen Schraubstock eingespannt und es werden entstehende Dämpfe von oben abgesaugt (siehe Abb. 3.42). Der Schnitt erfolgt in Richtung einer montierten Kamera, die auf die Unterseite des Blechs gerichtet ist. Folgende Parameter werden für die Schnitte verwendet:

P	Tastverh.	Freq.	Vorschub	Fokusbilge	Standoff	Düsen \varnothing	p-Gas
1500 W	CW	CW	2000 $\frac{mm}{min}$	-1,5 mm	1 mm	2 mm	10 bar

Tabelle 3.32.: Schnittparameter, Proben 1 bis 5, 2 mm 1.4307

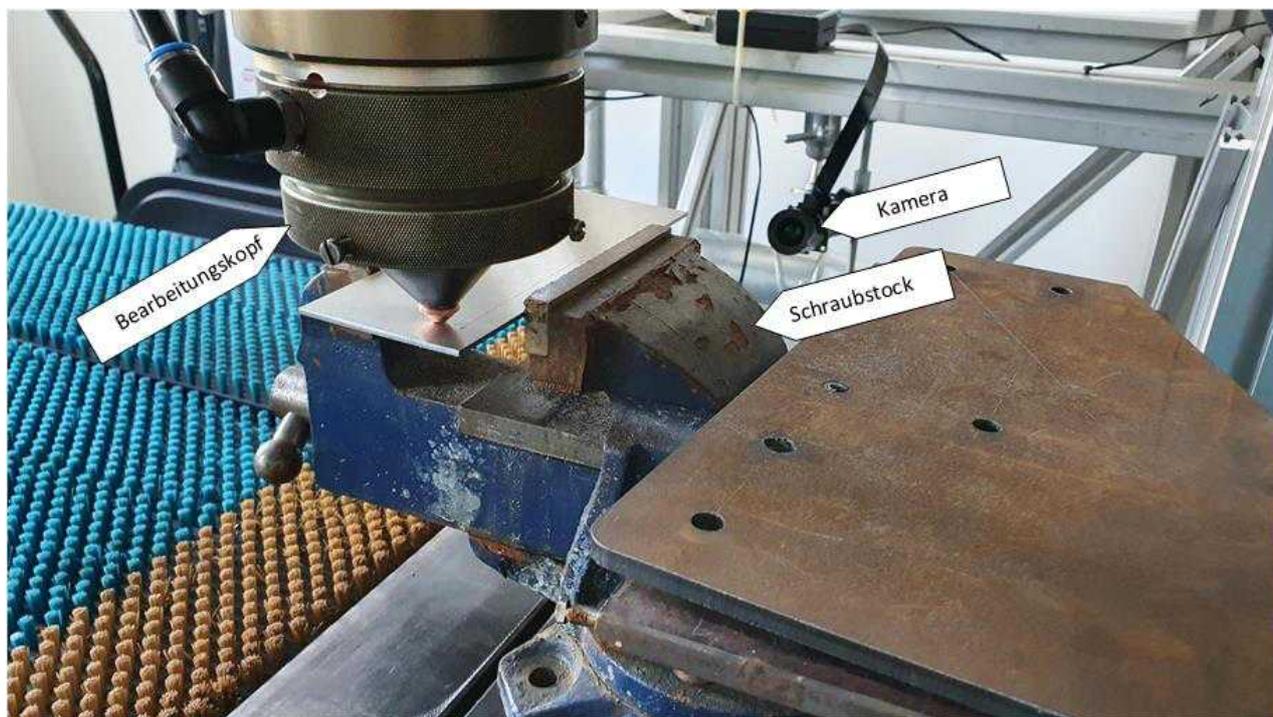


Abbildung 3.42.: Versuchsaufbau, Schraubstock mit 2 mm 1.4307 und Kamera

Abbildung [3.43](#) zeigt die Unterseite der Schnitte 1 - 4. Gut erkennbar ist, dass die Schnitte erst etwa im letzten Viertel unsauber werden und ein Grat entsteht. Dieser Grat befindet sich außerdem immer auf der gleichen Seite der Schnittfuge.



Abbildung 3.43.: Blick auf die Unterseite der Proben 1 bis 4

Zwei Fehlerquellen können bei einer Einspannung im Schraubstock nicht ausgeschlossen werden. Einerseits wird durch die Einspannung normal zur Schnitttrichtung eine Kraft eingebracht, die die Schnittfuge bei längeren Schnitten verformen kann. Andererseits ist nicht gewährleistet, dass das Blech vollkommen plan eingespannt wird, also der Abstand von Düse und Blech bei Verfahren in x- und y-Richtung gleich bleibt. Um eine vollkommen plane und spannungsfreie Einspannung zu gewährleisten, wird das Blech in einen Rahmen gespannt (siehe Abb. [3.44](#)). Die Kamera wird dabei durch ein aktives Schweißschutzglas und einen Crossjet vor Funken geschützt.

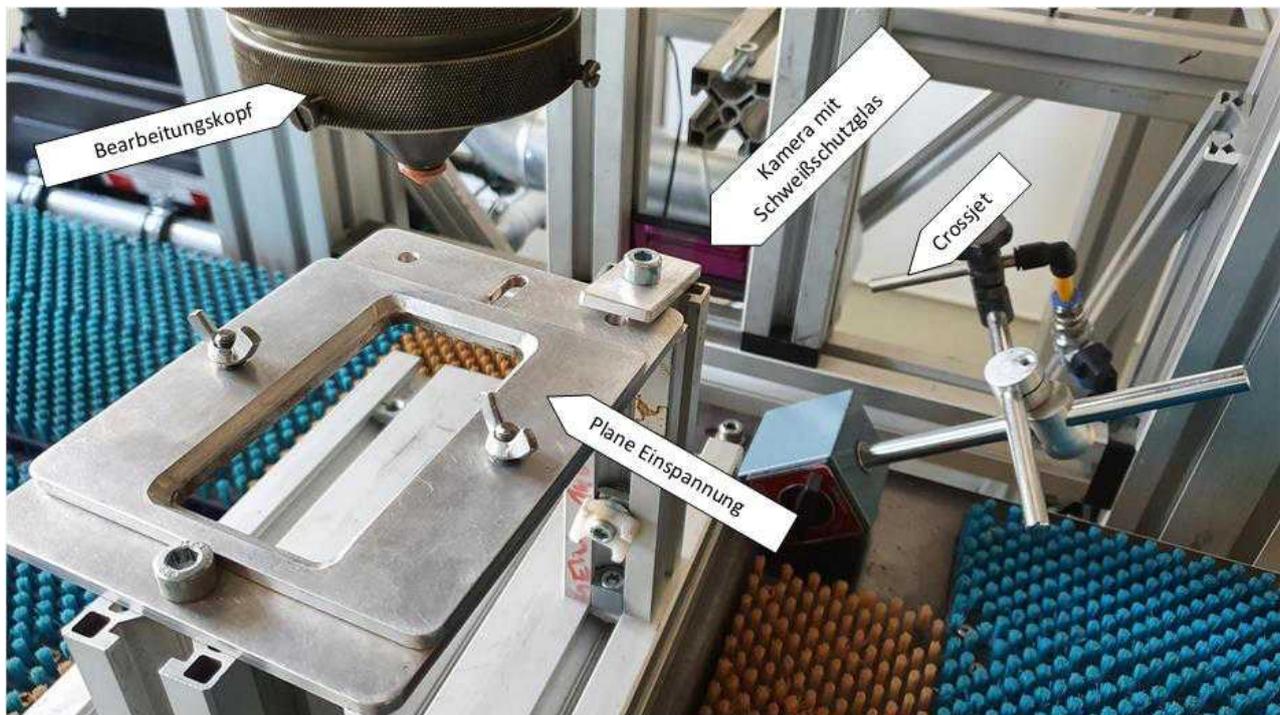


Abbildung 3.44.: Versuchsaufbau, Plane Einspannung, Kamera mit Schweißschutzglas und Crossjet

Abbildung 3.45 zeigt einen sauberen Schnitt mit kleiner Gratbildung am Ende des Schnitts. Dieser Grat könnte der Tatsache geschuldet sein, dass der Gasstrom nach Ausschalten der Laserstrahlung für kurze Zeit weiter bestehen bleibt, da sich der hohe Druck (rund 10 bar) in der Zuleitung zum Bearbeitungskopf verzögert abbaut. Der Gasstrom reißt dabei Schmelze mit, die bei der Abkühlung zunehmend zäher wird und schließlich als Grat erstarrt.



Abbildung 3.45.: Blick auf die Unterseite der Probe 5

Der Durchmesser des Einstichs bei Probe 5 ist ähnlich groß wie die Breite der Schnittfuge (siehe Abb. 3.46).

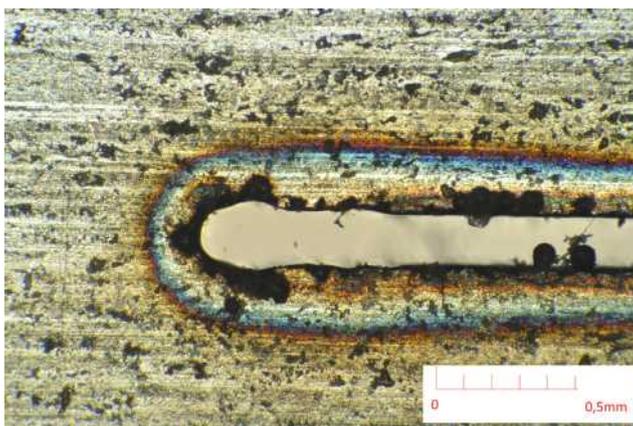


Abbildung 3.46.: Einstich der Probe 5, 2 mm, 1.4307

Betrachtet man die Kameraaufnahmen der Proben 1 - 5, fällt auf, dass sich die nach unten ausgeblasene Schmelze in unregelmäßigen Abständen stark zu einer Seite neigt. Diese Ablenkung beträgt in etwa 20 Grad. Die Richtung der Ablenkung ist unterschiedlich. Bei Probe 4 scheint ein Zusammenhang zwischen Position des Grats und Richtung der Ablenkung der Schmelze zu bestehen.

Abbildung 3.47 zeigt den Sollzustand. Die Schmelze wird durch den hohen Gasdruck kegelförmig ausgeblasen. Es findet keine nennenswerte Ablenkung zu einer Seite statt. Die folgenden Abbildungen zeigen die Unterseite der Proben, die Schnittfront bewegt sich auf die Kamera zu. Den folgenden Kamerabildern ist eine Rückreflexion überlagert. Ein passender Polfilter stand kurzfristig nicht zur Verfügung.

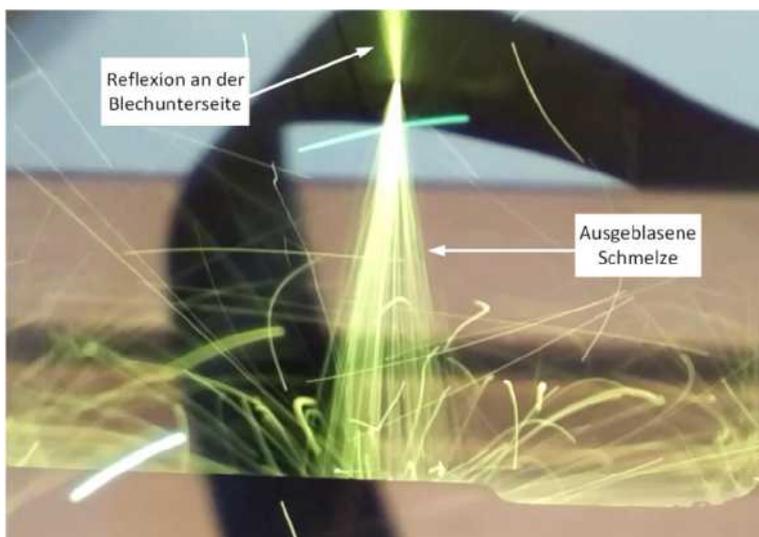


Abbildung 3.47.: Kameraaufnahme der Probe 4 ohne Ablenkung der Schmelze

In Abbildung 3.48 erkennt man eine Ablenkung in Schnittrichtung nach rechts. Die Kegelform ist lokal zwar vorhanden, die Schmelze wird aber, etwa einen Zentimeter unter dem Austritt aus dem Blech, nach links abgelenkt. Dort bricht die Kegelform zusammen, es gibt Teilchen, die

eine Kurve mit stärkerem Radius machen und Teilchen, die weniger stark nach links abgelenkt werden.

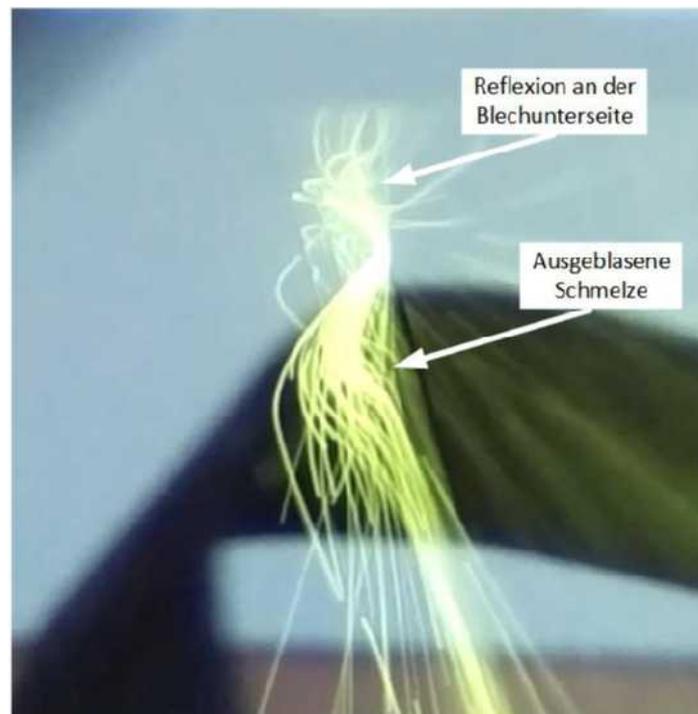


Abbildung 3.48.: Kameraaufnahme der Probe 4 mit Ablenkung der Schmelze in Schnittrichtung rechts

Der Grat, der sich bei Probe 4 am Ende des Schnitts bildet, korreliert mit der Ablenkung der Schmelze an dieser Stelle. Bei Probe 5 wird die modifizierte Einspannung verwendet. Hier zeigt sich, dass die Schmelze stellenweise ebenfalls abgelenkt wird. Im Unterschied zu den Proben 1 - 4 tritt die Schmelze im ersten Stück unter der Probe aber gerade aus. Die Ablenkung scheint erst weiter unterhalb der Probe zu passieren (siehe Abb. [3.49](#) und [3.50](#)).

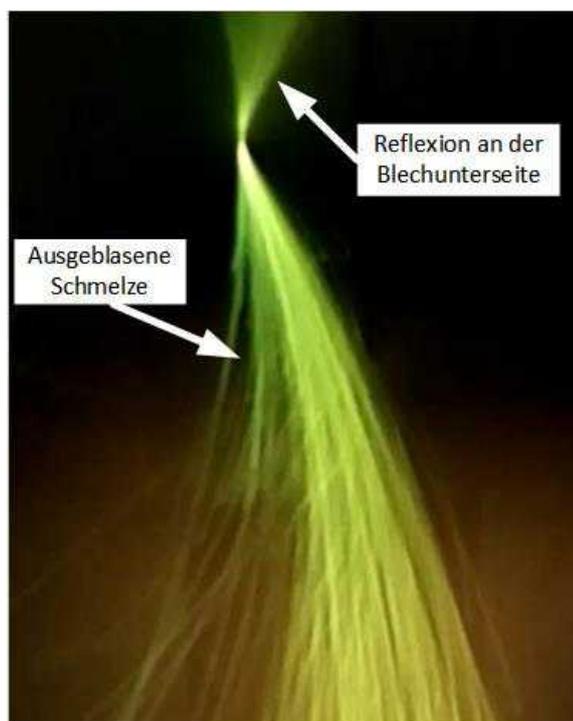


Abbildung 3.49.: Probe 5, Ablenkung nach links

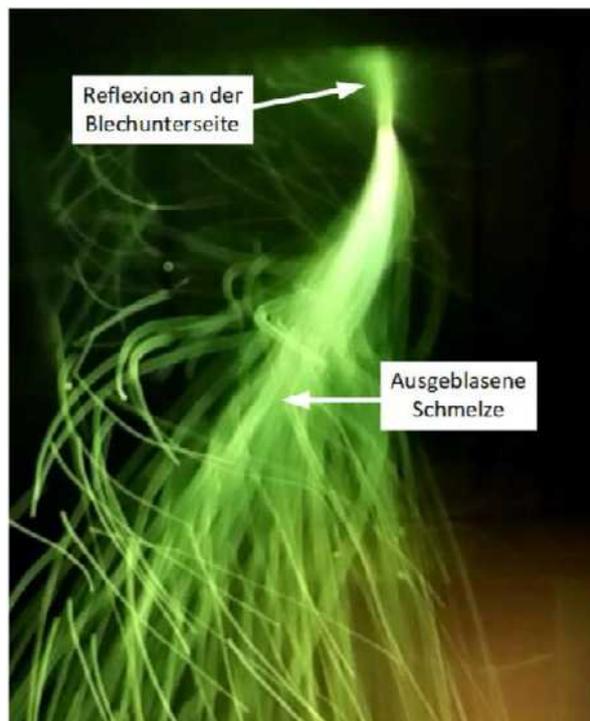


Abbildung 3.50.: Probe 5, Ablenkung nach rechts

In Abbildung [3.50](#) wird die austretende Schmelze offenbar durch eine turbulente Strömung gestört. Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen wäre eine Ablenkung des Gasstromes am Boden der Vorrichtung (etwa 150 mm unter dem Blech). Möglicherweise bilden sich dort bei länger dauernden Schnitten Verwirbelungen, die den Schnittvorgang stören. Man kann annehmen, dass bei optimalen Bedingungen gratfreie Schnitte in 2 mm 1.4301 möglich sind. Die Fehlerquelle des Absorbers kann nicht vollständig eliminiert werden, da der Schraubstock und die Vorrichtung zum planen Spannen ebenfalls Böden haben, an denen es zu Verwirbelungen kommt. Der Einfluss des Vorschubs scheint von kleinerer Bedeutung für die Qualität der Schnitte zu sein.

3.6.5. Einstiche in 6 mm Baustahl

Im Gegensatz zu den Einstichen in 1.4307 wird bei den Einstichen in Baustahl Sauerstoff als Prozessgas eingesetzt. Die exotherme Reaktion des Sauerstoffs mit dem erhitzten Baustahl (Oxidation) führt zu einem deutlichen Leistungsgewinn im Laserschneidprozess. Man spricht von Laserbrennschneiden, bzw. Laserbrennbohren. Dadurch ist es möglich mit der selben Laserleistung größere Blechstärken zu schneiden, bzw. einzustechen. Das Problem bei Einstichen mit Sauerstoff als Prozessgas ist die schwierige Kontrollierbarkeit des Lochdurchmessers auf der Oberseite des Blechs. Bezugnehmend auf [10](#) wird der Gasdruck auf 0,8 bar erheblich reduziert im Vergleich zum Laserschmelzschnitten.

Für die Versuche 1.1 - 3.7 werden folgende fixe Parameter verwendet:

Probe #	Tastverh.	Freq.	Burstzeit	Fokuslage	Standoff	Düsen \varnothing	p-Gas
1.1 - 1.7	CW	CW	1500 ms	0 mm	1 mm	2 mm	0,8 bar
2.1 - 2.7	CW	CW	500 ms	0 mm	1 mm	2 mm	0,8 bar
3.1 - 3.7	CW	CW	200 ms	0 mm	1 mm	2 mm	0,8 bar

Tabelle 3.33.: Fixe Parameter, Proben 1.1 bis 3.7, 6 mm Baustahl

Alle Einstiche dieser ersten Versuche sind stark ausgebrannt. Die Durchmesser an der Oberseite des Blechs betragen zwischen 5 mm und 2,5 mm, die Durchmesser an der Unterseite des Blechs in etwa 2 mm (siehe Abb. 3.51 - 3.54).



Abbildung 3.51.: Probe 1, Oberseite, 6 mm Baustahl



Abbildung 3.52.: Probe 1, Unterseite, 6 mm Baustahl



Abbildung 3.53.: Probe 3, Oberseite, 6 mm Baustahl



Abbildung 3.54.: Probe 3, Unterseite, 6 mm Baustahl

Bei Beobachtung des Prozesses durch das Schaufenster ist deutlich zu erkennen, dass Metall aufgeschmolzen wird, lange nachdem der Laser bereits ausgeschaltet wurde. Das liegt daran, dass im CNC-Programm der Gasfluss zwischen den Einstichen eingeschaltet bleibt. Beim Einstechen, bzw. Schneiden mit Stickstoff ist das kein Problem. Im Gegenteil, die eingebrachte Wärme wird schneller entzogen und die WEZ bleibt klein. Beim Einstechen mit Sauerstoff ist das Prozessgas aber reaktiv mit der Schmelze, wodurch weiter (chemische) Energie eingebracht wird, wenn der Gasstrom bestehen bleibt. Deshalb wird in den folgenden Versuchen der Prozessgasfluss erst unmittelbar vor dem Einschalten der Laserstrahlung eingeschaltet und unmittelbar nach dem Ausschalten der Laserstrahlung ausgeschaltet. Ab Versuch 5 wird zusätzlich eine sechssekündige Wartezeit zwischen den Einstichen programmiert, um die Temperatur an der Oberfläche des Metalls nicht zu hoch werden zu lassen und die Ergebnisse möglichst wenig zu verfälschen.

Bei den Versuchen 5.1 - 6.7 wird mit folgenden fixen Parametern anschließend die minimal erforderliche Energie zum Einstechen gesucht:

Probe #	Tastverh.	Freq.	Burstzeit	Fokusbildung	Standoff	Düsen \varnothing	p-Gas
5.1 - 6.7	CW	CW	300 ms	0 mm	1 mm	2 mm	0,8 bar

Tabelle 3.34.: Fixe Parameter, Proben 5.1 bis 6.7, 6 mm Baustahl

Die Leistung wird, wie in vorangegangenen Versuchen, schrittweise reduziert (siehe Tab. 3.35).

Probe #	P	eingebrachte Laserenergie	Durchgestochen?
5.1 - 5.7	1500 W - 900 W	450 J - 270 J	Ja
6.1 - 6.7	800 W - 200 W	240 J - 60 J	Nein

Tabelle 3.35.: Variable Parameter, Proben 5.1 bis 6.7, 6 mm Baustahl

Erstaunlicherweise reicht ein Unterschied von 100 W, bzw. 30 J aus, um von einem Einstich mit großem Durchmesser und starker Reaktion (Probe 5.7) zu keinem Durchstich zu kommen (Probe 6.1). Die Reaktion mit Sauerstoff als Prozessgas scheint im CW-Betrieb kaum kontrollierbar zu sein. Daher werden Versuche mit gepulster Laserstrahlung mit folgenden fixen Parametern durchgeführt:

Probe #	Leistung	Freq.	Burstzeit	Fokusbildung	Standoff	Düsen \varnothing	p-Gas
8.1 - 8.7	1000 W	100 Hz	500 ms	0 mm	1 mm	2 mm	0,8 bar
9.1 - 9.7	1000 W	100 Hz	700 ms	0 mm	1 mm	2 mm	0,8 bar
10.1 - 10.7	1000 W	100 Hz	1200 ms	0 mm	1 mm	2 mm	0,8 bar
11.1 - 11.7	1000 W	100 Hz	2000 ms	0 mm	1 mm	2 mm	0,8 bar
12.1 - 12.7	1000 W	100 Hz	2500 ms	0 mm	1 mm	2 mm	0,8 bar
13.1 - 13.7	1000 W	100 Hz	2700 ms	0 mm	1 mm	2 mm	0,8 bar

Tabelle 3.36.: Fixe Parameter, Proben 8.1 bis 13.7, 6 mm Baustahl

Das Tastverhältnis ist der variable Parameter (siehe Tab. 3.37).

Probe #	Tastverh.	eingebrachte Laserenergie
8.1 - 8.7	90 % - 30 %	450 J - 150 J
9.1 - 9.7	90 % - 30 %	630 J - 210 J
10.1 - 10.7	90 % - 30 %	1080 J - 360 J
11.1 - 11.7	90 % - 30 %	1800 J - 600 J
12.1 - 12.7	90 % - 30 %	2250 J - 750 J
13.1 - 13.7	80 % - 20 %	2160 J - 540 J

Tabelle 3.37.: Variable Parameter, Proben 8.1 bis 13.7, 6 mm Baustahl

Keiner dieser Versuche führt zu einem Durchstich. Da der Energieeintrag schon sehr hoch ist (2160 J bei Probe 13.1) wird bei Versuch 14 die Leistung auf 1500 W erhöht und die „Burstzeit“ auf 2 s reduziert. Dadurch kann die eingebrachte Laserenergie, bei gesteigerter Leistung, verringert werden. Die gesteigerte Laserleistung soll gleichzeitig zum gewünschten Ergebnis des Durchstechens führen. Folgende fixe Parameter finden in Versuch 14.1 - 14.7 Anwendung:

Probe #	P	Freq.	Burstzeit	Fokusslage	Standoff	Düsen \varnothing	p-Gas
14.1 - 14.7	1500 W	100 Hz	2000 ms	0 mm	1 mm	2 mm	0,8 bar

Tabelle 3.38.: Fixe Parameter, Proben 14.1 bis 14.7, 6 mm Baustahl

Das Tastverhältnis ist der variable Parameter:

Probe #	Tastverh.	eingebrachte Laserenergie
14.1 - 14.7	70 % - 10 %	2100 J - 300 J

Tabelle 3.39.: Variable Parameter, Proben 14.1 bis 14.7, 6 mm Baustahl

Bei den Proben 14.1 - 14.4 kommt es zum Durchstich (siehe Abb. [3.55](#) - [3.58](#)). Die Ränder der Einstiche sind auf den folgenden Abbildungen zur besseren Sichtbarkeit mit roter Farbe markiert. Die Durchmesser der Einstiche auf den Ober- und Unterseiten der Proben werden mit niedrigerem Tastverhältnis kleiner. Bei Probe 14.1, mit 70 % Tastverhältnis, beträgt der Durchmesser auf der Oberseite etwa 0,5 mm. Bei Probe 14.4, mit 40 % Tastverhältnis, nur etwa 0,3 mm.

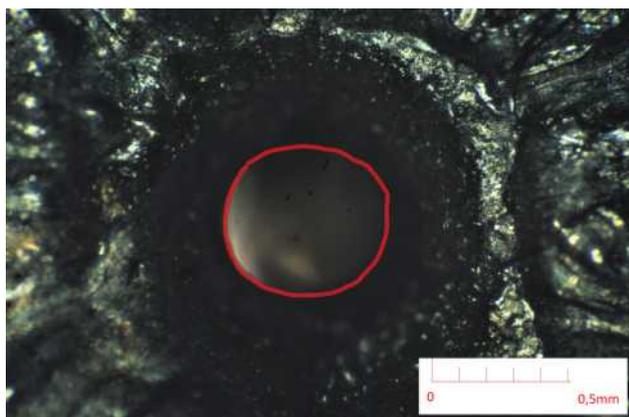


Abbildung 3.55.: Probe 14.1, Oberseite, 6 mm Baustahl

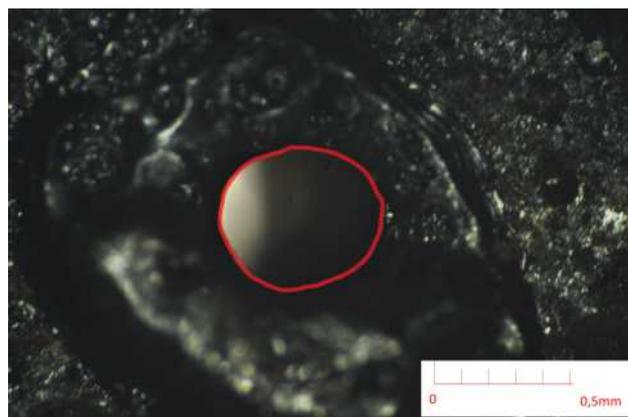


Abbildung 3.56.: Probe 14.1, Unterseite, 6 mm Baustahl

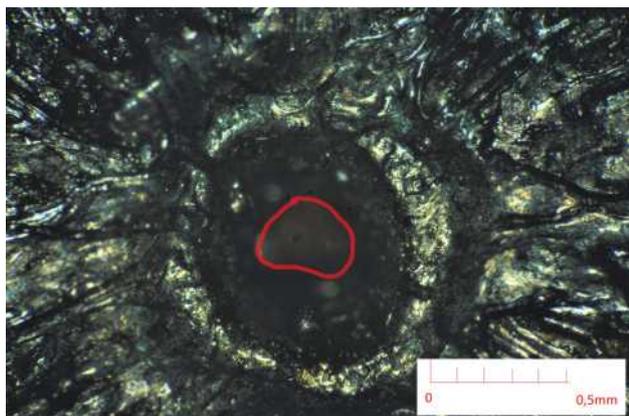


Abbildung 3.57.: Probe 14.4, Oberseite, 6 mm Baustahl



Abbildung 3.58.: Probe 14.4, Unterseite, 6 mm Baustahl

Die ins Material eingebrachte Laserenergie ist sehr hoch, weshalb die „Burstzeit“ auf 1,7s verringert wird.

Die fixen Parameter für Versuch 15.1 - 15.7 lauten wie folgt:

Probe #	P	Freq.	Burstzeit	Fokusslage	Standoff	Düsen Ø	p-Gas
15.1 - 15.7	1500 W	100 Hz	1700 ms	0 mm	1 mm	2 mm	0,8 bar

Tabelle 3.40.: Fixe Parameter, Proben 15.1 bis 15.7, 6 mm Baustahl

Wobei das Tastverhältnis der variable Parameter ist:

Probe #	Tastverh.	eingebrachte Laserenergie
15.1 - 15.7	80 % - 20 %	2100 J - 300 J

Tabelle 3.41.: Variable Parameter, Proben 15.1 bis 15.7, 6 mm Baustahl

Die Probe 15.4 zeigt die besten Ergebnisse. Der Durchmesser auf der Oberseite des Blechs beträgt etwa 0,3 mm, der Durchmesser auf der Unterseite etwa 0,4 mm. Der Grund, aus dem die Parameter der Probe 15.4 vorteilhaft sind, ist die Toleranz gegenüber längerer „Burstzeiten“ (Proben 14.1 - 14.4) und größeren Tastverhältnissen (Proben 15.1 - 15.3). Die Einstiche ändern ihre Charakteristik dabei kaum.

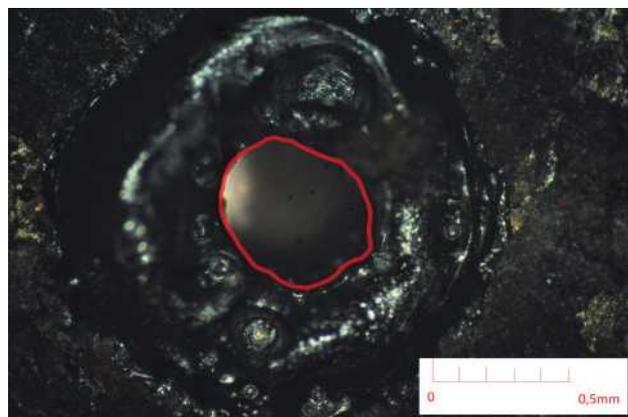
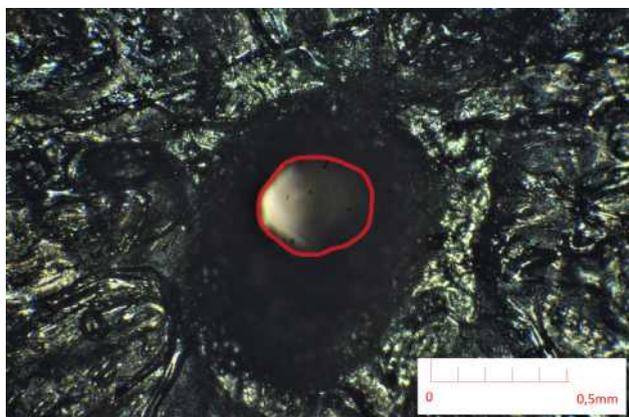


Abbildung 3.59.: Probe 15.4, Oberseite, 6 mm Baustahl

Abbildung 3.60.: Probe 15.4, Unterseite, 6 mm Baustahl

Folgende optimale Parameter für das Einstechen in 6 mm Baustahl können angegeben werden:

Probe #	P	Tastverh.	Freq.	Burst	Fokuslage	Standoff	Düsen \varnothing	p-Gas
15.4	1500 W	50 %	100 Hz	1700 ms	0 mm	1 mm	2 mm	0,8 bar

Tabelle 3.42.: Optimale Parameter, Einstich in 6 mm Baustahl

3.6.6. Einstiche in 3 mm Aluminium

Die Einstiche in Aluminium werden mit Stickstoff als Prozessgas durchgeführt. Aufgrund der hohen Reflektivität von Aluminium ist mit höheren notwendigen Laserenergien zu rechnen. Erstes Ziel ist die Ermittlung der minimalen Einstichleistung im CW-Betrieb. Die Startparameter werden laut [10] folgendermaßen gewählt:

Probe #	Tastverh.	Freq.	Burstzeit	Fokusslage	Standoff	Düsen \varnothing	p-Gas
1.1 - 1.7	CW	CW	1000 ms	-0,5 mm	0,7 mm	2 mm	12 bar
2.1 - 2.7	CW	CW	1200 ms	-0,5 mm	0,7 mm	2 mm	12 bar
3.1 - 3.7	CW	CW	1500 ms	-0,5 mm	0,7 mm	2 mm	12 bar
4.1 - 4.7	CW	CW	1700 ms	-0,5 mm	0,7 mm	2 mm	12 bar
5.1 - 5.7	CW	CW	1900 ms	-0,5 mm	0,7 mm	2 mm	12 bar
6.1 - 6.7	CW	CW	2100 ms	-0,5 mm	0,7 mm	2 mm	12 bar
7.1 - 7.7	CW	CW	2300 ms	-0,5 mm	0,7 mm	2 mm	12 bar
8.1 - 8.7	CW	CW	2600 ms	-0,5 mm	0,7 mm	2 mm	12 bar
9.1 - 9.7	CW	CW	3000 ms	-1,2 mm	0,7 mm	2 mm	12 bar

Tabelle 3.43.: Fixe Parameter, Proben 1.1 bis 9.7, 3 mm Aluminium

Die Leistung des Laserstrahls wird wie folgt variiert:

Probe #	P	eingebrachte Laserenergie
1.1 - 1.7	1500 W - 900 W	1500 J - 900 J
2.1 - 2.7	1500 W - 900 W	1800 J - 1080 J
3.1 - 3.7	1500 W - 900 W	2250 J - 1350 J
4.1 - 4.7	1500 W - 900 W	2550 J - 1530 J
5.1 - 5.7	1500 W - 900 W	2850 J - 1710 J
6.1 - 6.7	1500 W - 900 W	3150 J - 1890 J
7.1 - 7.7	1500 W - 900 W	3450 J - 2070 J
8.1 - 8.7	1500 W - 900 W	3900 J - 2340 J
9.1 - 9.7	1500 W - 900 W	4500 J - 2700 J

Tabelle 3.44.: Variable Parameter, Proben 1.1 bis 9.7, 3 mm Aluminium

Die minimal aufzuwendende Energie für einen Durchstich beträgt 4500 J, bzw. 1500 W bei 3 s (Probe 9.1). Die Oberseite des Einstichs ist stark aufgeschmolzen mit einem Einstichdurchmesser von etwa 1 mm (siehe Abb. [3.61](#)). Bei allen anderen Versuchen war es nicht möglich durch das Material durchzustechen.



Abbildung 3.61.: Probe 9.1, Oberseite, 3 mm Aluminium

Abbildung 3.62.: Probe 9.1, Unterseite, 3 mm Aluminium

Die Versuche 10.1 - 12.7 werden mit gepulster Laserstrahlung mit 100 Hz und 500 Hz Pulsfrequenz durchgeführt. Die „Burstzeit“ wird auf 3,3 s gesteigert. Dennoch ist kein Durchstich möglich. Die Durchmesser an der Oberseite werden speziell bei den Proben 12.1 - 12.7 sehr groß (siehe Abb. [3.63](#)).

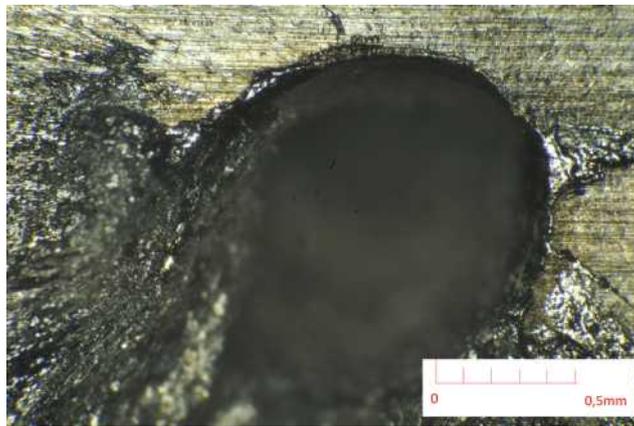


Abbildung 3.63.: Einstich der Probe 12.1, 3 mm Aluminium

Deshalb wird der Abstand des Fokus zur Düse (z_F) stetig in Richtung Unterseite der Proben vergrößert. Außerdem wird ab Probe 14.1 der Düsendurchmesser von 2 mm auf 1,5 mm reduziert, um eine höhere Prozessgasgeschwindigkeit zu erreichen und gleichzeitig den Gasstrahl schmaler zu machen. Der Gasdruck wird ab Probe 18.1 auf 10 bar reduziert.

Probe #	P	Freq.	Burstzeit	Fokusslage	Standoff	Düsen \varnothing	p-Gas
13.1 - 13.7	1500 W	100 Hz	3300 ms	-1,3 mm	0,7 mm	2 mm	12 bar
14.1 - 14.7	1500 W	100 Hz	3300 ms	-1,3 mm	0,7 mm	1,5 mm	12 bar
15.1 - 15.7	1500 W	100 Hz	3300 ms	-2,3 mm	0,7 mm	1,5 mm	12 bar
16.1 - 16.7	1500 W	100 Hz	3300 ms	-2,6 mm	0,7 mm	1,5 mm	12 bar
17.1 - 17.7	1500 W	100 Hz	3300 ms	-2,9 mm	0,7 mm	1,5 mm	12 bar
18.1 - 18.7	1500 W	100 Hz	3300 ms	-3,1 mm	0,7 mm	1,5 mm	10 bar

Tabelle 3.45.: Fixe Parameter, Proben 13.1 bis 18.7, 3 mm Aluminium

Das Tastverhältnis wird variiert:

Probe #	Tastverhältnis	eingebrachte Laserenergie
13.1 - 18.7	90 % - 30 %	4455 J - 1485 J

Tabelle 3.46.: Variable Parameter, Proben 13.1 bis 18.7, 3 mm Aluminium

Ein Durchstich wird bei den Proben 18.1 - 18.3 erreicht. Ausschlaggebend für den Durchstich bei den Proben 18.1 - 18.3 dürfte die Fokussierung des Laserstrahls nahe der Unterseite der Proben sein. Zu Ungunsten des Durchmessers des Einstichs an der Oberseite der Proben (siehe Abb. [3.64](#) - [3.67](#)).



Abbildung 3.64.: Probe 18.1, Oberseite, 3 mm Aluminium

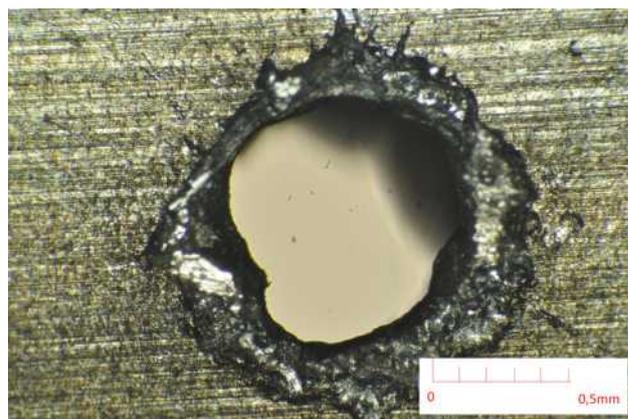


Abbildung 3.65.: Probe 18.1, Unterseite, 3 mm Aluminium

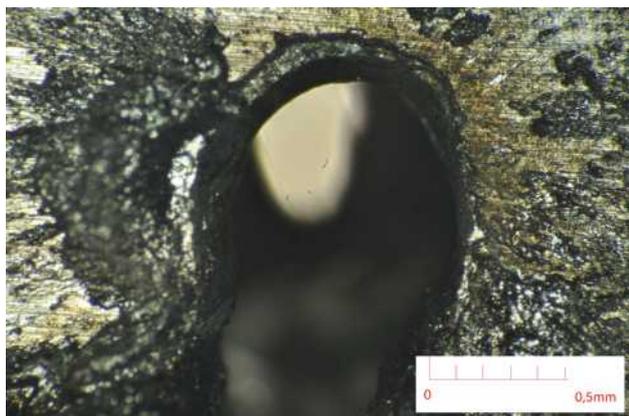


Abbildung 3.66.: Probe 18.3, Oberseite, 3 mm Aluminium

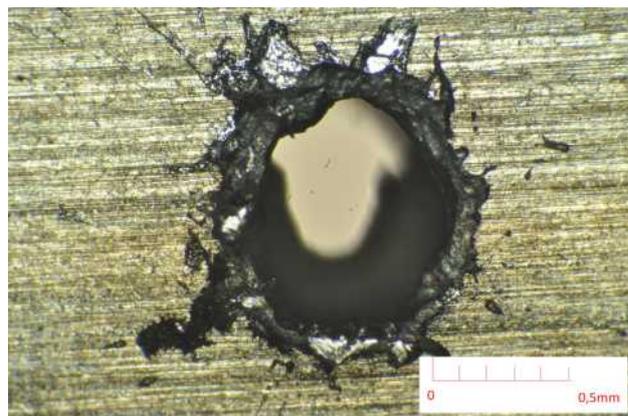


Abbildung 3.67.: Probe 18.3, Unterseite, 3 mm Aluminium

Passende Parameter im CW-Betrieb scheinen erfolgversprechender zu sein. Durch die veränderte Fokusslage kann eventuell mit geringerer Leistung als bei Probe 9.1 eingestochen werden. Dazu werden folgende fixe Parameter verwendet:

Probe #	P	Tastverh.	Freq.	Fokusslage	Standoff	Düsen Ø	p-Gas
23.1 - 24.7	1500 W	CW	CW	-3,1 mm	0,7 mm	1,5 mm	10 bar

Tabelle 3.47.: Fixe Parameter, Proben 23.1 bis 24.7, 3 mm Aluminium

Die „Burstzeit“ wird variiert:

Probe #	„Burstzeit“	eingebraachte Laserenergie
23.1 - 24.7	2,8 s - 0,2 s	4200 J - 300 J

Tabelle 3.48.: Variable Parameter, Proben 23.1 bis 24.7, 3 mm Aluminium

Die minimal benötigte Energie für einen Durchstich beträgt, bei einer Fokusslage von -3,8 mm und einer „Burstzeit“ von 1,2 s, 1800 J (Probe 24.2). Der Einstich ist an der Oberseite ellipsoförmig mit einer Größe von etwa 1,2 mm x 0,6 mm (siehe Abb. 3.68).

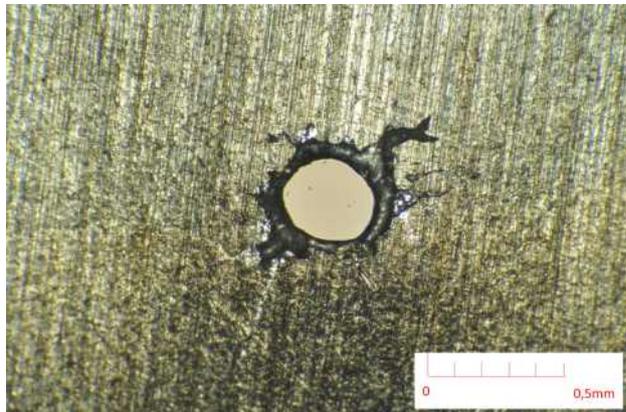
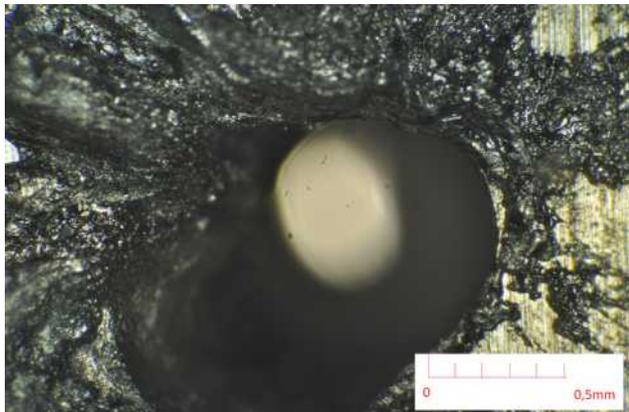


Abbildung 3.68.: Probe 24.2, Oberseite, 3 mm Aluminium

Abbildung 3.69.: Probe 24.2, Unterseite, 3 mm Aluminium

Längere „Burstzeiten“ führen grundsätzlich auch zu sauberen Einstichen, jedoch scheint es bei Probe 23.3 zu einem Wiederverschließen des Einstichs gekommen zu sein.

Versuche mit identen Parametern (wie in Versuchen 23.1 - 23.7) und einem Düsendurchmesser von 1 mm führen ebenfalls zu Durchstichen, bringen aber keine Verbesserung hinsichtlich des Durchmessers an der Oberseite der Einstichstelle.

Aufgrund des großen Durchmessers des Einstichs an der Oberseite von Probe 24.2 kann nicht gezeigt werden, dass eine Verschiebung des Fokus zur Unterseite des Blechs große Vorteile hinsichtlich der definierten Qualitätsmerkmale bringt. Trotzdem sind die Parameter von Probe 24.2 zu bevorzugen, da die eingebrachte Laserenergie mit 1800 J wesentlich geringer ist als die in Probe 9.1 eingebrachte mit 4500 J.

Probe #	P	Tastverh.	Freq.	Burst	Fokusslage	Standoff	Düsen \varnothing	p-Gas
24.2	1500 W	CW	CW	1200 ms	-3,1 mm	0,7 mm	1,5 mm	10 bar

Tabelle 3.49.: Optimale Parameter, Einstich in 3 mm Aluminium

4. Zusammenfassung und Aussicht

4.1. Erkenntnisse und mögliche Optimierungen

4.1.1. Anlagenumbau

Im Laufe der Arbeit zeigten sich einige Schwächen des Aufbaus der Anlage. Grundsätzlich können Bleche eingespannt und geschnitten werden. Jedoch müssen Bleche eben und gratfrei sein. Die kleinste Verformung eines Blechs, bzw. der kleinste Grat verursacht eine Veränderung des Abstands von Düse zu Blech. Dadurch ändert sich sowohl der „Standoff“ als auch die Lage des Fokus bezogen auf das gerade bearbeitete Blech. Ohne Distanzregelung zwischen Düse und Blech ist es nicht möglich die Parameter „Standoff“ und Fokusabstand konstant zu halten. Diese Ungenauigkeit wirkt sich, vor allem bei Blechen mit größerer Materialstärke, in schlechter Wiederholgenauigkeit der Schnitte aus. Ein Laser mit einer größerer Leistung würde auch bei größeren Materialstärken einen Leistungsüberschuss sicherstellen. Bei dünneren Blechen kommt es bei Schnitten zu einem Verzug der Bleche. Deshalb kann nicht garantiert werden, dass die ermittelten optimalen Parameter mit jeder Blechtafel funktionieren. Der (neuerliche) Einbau einer Distanzregelung würde Schnitte langfristig enorm verbessern.

Ein weiterer zu verbessernder Punkt ist die große Auskragung der z-Achse. Wird die y-Achse bewegt, fängt die auf der y-Achse montierte z-Achse, zu schwingen an. Diese Schwingungen sind nicht vorhersehbar, da sie vom jeweiligen CNC-Programm abhängen. Die Folge der Bewegungen der y-Achse und die Beschleunigungen, die die z-Achse dabei erfährt, beeinflussen das Schwingungsverhalten. Ein Verbesserungsvorschlag wäre eine mit der y-Achse mitlaufende, zusätzliche Achse. Ein darauf laufender Schlitten könnte mit der z-Achse verschraubt werden (siehe Abb. [4.1](#)).

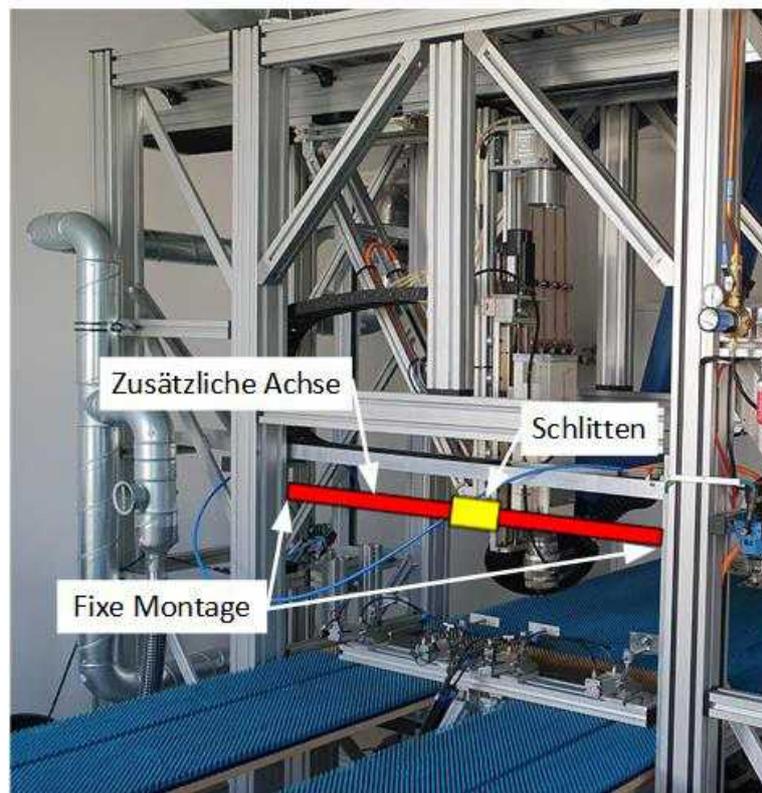


Abbildung 4.1.: Mögliche Versteifung der y-Achse

Eine solche mitlaufende Achse würde das System allerdings statisch überdefinieren und demnach vermutlich stellenweise zu hohen Lagerkräften und großem Verschleiß führen.

Eine weitere mögliche Verbesserung betrifft den Strahlabsorber, dessen Eintrittsfuge durch Bedienungsfehler bereits stark verschlissen ist. Ein Neubau sollte eine schnelle Wechselmöglichkeit der verschlissenen Auflagen bieten, die diese Eintrittsfuge bilden, um immer über einer konstant breiten Fuge schneiden zu können.

Betreffend der Kommunikation von SPS und Laser wäre eine direkte Ansteuerung des Eingangs, „X434.5, EXT. PULSE 15 V“ des Lasers, von der SPS aus, denkbar. Damit könnte aus dem CNC-Programm heraus gepulst werden. Die Pulsfrequenz könnte direkt im CNC-Programm festgelegt werden. Das würde die Bedienung des Lasers aber nur unwesentlich vereinfachen, da dennoch manuell auf die Pulsprogramme zugegriffen werden muss, um beispielsweise die richtigen Signalquellen auszuwählen.

4.1.2. CNC-Code

Der Prozess „Einstecken“ kann als separater Baustein gesehen werden, der je nach Material und Stärke vor den Code zum Schneiden gesetzt werden kann. Um diesen Baustein einfach kopieren zu können, bietet sich an, dass das Laserprogramm zum Einstecken eine fixe Programmnummer bekommt (11). Die Programmnummer für den Schneidprozess ist in den nachfolgenden Beispielen ebenfalls fix (10).

Wichtig zu beachten ist, dass die „Burstzeit“ sowie die Pulsfrequenz des Lasers ausschließlich am Laserpanel eingestellt werden können. Im CNC-Programm findet sich lediglich eine Wartezeit, die der „Burstzeit“ entspricht, jedoch keinen Einfluss auf diese hat.

Im Laufe der Arbeit hat sich gezeigt, dass Einstiche mit Sauerstoff und Stickstoff einen unterschiedlichen Ablauf des CNC-Programms erfordern. Bei Einstichen mit Stickstoff als Prozessgas kann das Magnetventil, das das Gas schaltet, schon eine Sekunde vor dem Einschalten der Laserstrahlung geöffnet werden. Das hat den Vorteil, dass sich bei Beginn des Einstichs schon ein konstanter Gasstrom eingestellt hat. Dieser konstante Gasstrom erhöht die Chance auf geringe Mengen an rekristallisierter Schmelze auf der Oberseite der Probe und hält das Material kühl. In Listing 4.1 ist der prinzipielle Ablauf für Schnitte mit Einstichen in „Edelstählen“ und Aluminium zu sehen.

```

(---Einstich 1---)
2 N010 MW1=1500 (1500W Leistung)
  N020 MW2=100 (100 Prozent Tastverh)
4 N030 MW4=11 (Programmnummer 11 – Einstichprogramm)
  N040 M51 (Stickstoff ein)
6 N050 G04 1 (1s warten für gleichmäßigen Gasfluss)
  N060 M43 (Shutter ein)
8 N070 M41 (Beam ein)
  N080 G04 1.2 (1.2s warten für Burst)
10 N090 M42 (Beam aus)
(---Schnitt 1---)
12 (...)
  N190 M44 (Shutter aus)
14 N200 M52 (Stickstoff aus)
  N210 M30 (Programmende)

```

Listing 4.1: Beispielcode für einen Einstich mit Stickstoff als Prozessgas

Anders als bei Einstichen mit Stickstoff, muss bei Einstichen mit Sauerstoff dieser dosierter eingesetzt werden, um ein Ausbrennen der Einstiche zu vermeiden und den Prozess reproduzierbar zu machen. Das liegt an der Reaktivität des Sauerstoffs mit dem Material (Baustahl) und dem Fakt, dass der Sauerstoff bei ausreichender Temperatur des Materials, auch bei ausgeschalteter Laserstrahlung, weiter mit dem Material reagiert. Ein prinzipieller CNC-Programmablauf für Einstiche mit Sauerstoff ist in Listing 4.2 zu sehen. Der Sauerstoff wird vor jedem Einstich, kurz vor Einschalten des Laserstrahls, eingeschalten. Nach Abwarten des „Bursts“ wird der Sauerstoff sofort ausgeschalten. Werden mehrere Einstiche in unmittelbarer Nähe gemacht, ist auf eine gewisse Abkühlzeit zu achten, um die Oberfläche des Blechs möglichst kühl zu halten.

```

1 (---Einstich 1---)
  N010 MW1=1500 (1500W Leistung)
3  N020 MW2=50 (50 Prozent Tastverh)
  N030 MW4=11 (Programmnummer 11 – Einstichprogramm)
5  N040 G04 1 (1s warten)
  N050 M55 (Sauerstoff ein)
7  N060 M43 (Shutter ein)
  N070 M41 (Beam ein)
9  N080 G04 1.7 (1.7s warten für Burst)
  N090 M42 (Beam aus)

```

```

11 N100 M56          (Sauerstoff aus)
    (---Schnitt 1---)
13 (...)
    N190 M44          (Shutter aus)
15 N200 M30          (Programmende)

```

Listing 4.2: Beispielcode für einen Einstich mit Sauerstoff als Prozessgas

Eine wichtige Erkenntnis ist außerdem, dass keinerlei zusätzliche Wartezeit im CNC-Programm über „G04-Befehle“ zwischen dem Vorgang des Einstechens und des Schnittes notwendig ist, da der Laser sehr schnell die eingestellte Leistung erreicht (siehe Listing [4.3](#)). Einstech- und Schnittprozesse können bausteinartig aufeinander folgen.

```

1  (---Einstich 1---)
    N010 MW1=400      (400W Leistung)
3  N020 MW2=10        (10 Prozent Tastverh)
    N030 MW4=11        (Programmnummer 11 – Einstichprogramm)
5  N040 M51           (Stickstoff ein)
    N050 G04 1         (1s warten für gleichmäßigen Gasfluss)
7  N060 M43           (Shutter ein)
    N070 M41           (Beam ein)
9  N080 G04 0.4       (0.4s warten für Burst)
    N090 M42           (Beam aus)
11 (---Schnitt 1---)
13 N100 G91 F4000     (relativ , 4000mm pro Minute)
    N110 MW1=1500      (1500W Leistung)
15 N120 MW2=100       (CW)
    N130 MW4=10        (Programmnummer 10 – Schnittprogramm)
17 N140 M41           (Beam ein)
    N150 G01 Y50       (Schneidbewegung)
19 N160 M42           (Beam aus)
    (...)
21 N200 M44           (Shutter aus)
    N210 M52           (Stickstoff aus)
23 N220 M30           (Programmende)

```

Listing 4.3: Beispielcode für einen Einstich mit nachfolgendem Schnitt mit Stickstoff als Prozessgas in 1mm 1.4307

Es kann keine genaue Aussage zur Größe, bzw. zur zeitlichen Dauer der Einschalttrampe der Laserstrahlung gemacht werden, sie ist jedoch für die hier untersuchten Bearbeitungsprozesse zu vernachlässigen.

4.1.3. Einstechparameter

Ein Ziel der Arbeit war es, das Einstechverhalten in unterschiedliche Metalle zu optimieren. In Abbildung [4.2](#) sind die eingebrachten Laserenergien für unterschiedliche Materialien und Blechstärken aufgetragen. Dabei muss man zwischen nicht optimierten und optimierten Werten unterscheiden. „Nicht optimiert“ bedeutet, dass mit CW-Laserstrahlung eingestochen wurde. Die orangen Balken beziehen sich auf die minimal notwendigen Einstichenergien

mit CW-Laserstrahlung. Bei 6 mm Baustahl konnten keine zufriedenstellenden Ergebnisse mit CW-Laserstrahlung erreicht werden, weshalb hier der nicht optimierte Wert fehlt. Die blauen Balken geben die Einstichenergien im optimierten Zustand an.

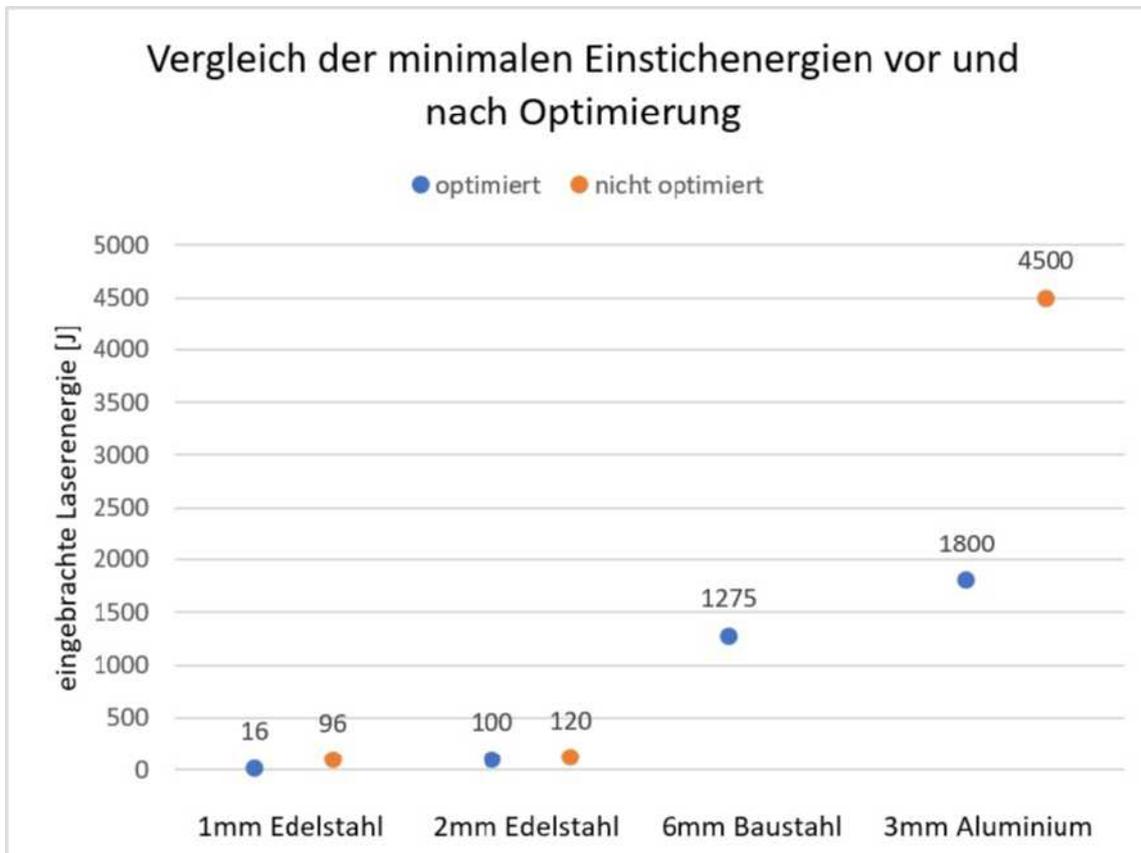


Abbildung 4.2.: Übersicht über die minimalen Einstichenergien, vor und nach der Optimierung

Im optimierten Zustand wird bei Stählen gepulste Laserstrahlung verwendet und bei Aluminium die Fokusslage verändert. Interessant zu sehen ist, dass mit gepulster Laserstrahlung bei Edelstahl und Baustahl die notwendige Einstichenergie reduziert werden kann. Die Effizienz des Einstichprozesses steigt. Bei 1 mm Edelstahl wird bei Einstichen mit gepulster Laserstrahlung nur 16 % der Energie benötigt, die mit CW-Laserstrahlung zum Einstechen notwendig wäre. Bei 2 mm Edelstahl kann die Effizienz nicht im selben Ausmaß gesteigert werden (gepulst 83 % der „CW-Energie“ notwendig). Bei Einstichen in 6 mm Baustahl wird ein sauberes, prozesssicheres Einstechen überhaupt erst durch den Einsatz von gepulster Laserstrahlung möglich. In Aluminium kann man mit gepulster Laserstrahlung nur schlecht einstechen. Hier ist die richtige Fokusslage, nahe der Blechunterseite, von entscheidender Bedeutung. Dadurch kann die erforderliche Laserenergie um mehr als die Hälfte reduziert werden. Die optimalen Parameter für den Einstichprozess können wie folgt zusammengefasst werden:

Material	P	Tastverh.	Freq.	Burst	Fokus	Standoff	Düsen \varnothing	p-Gas
1 mm Edelstahl	400 W	10 %	100 Hz	400 ms	-0,5 mm	1 mm	2 mm	8 bar
2 mm Edelstahl	500 W	50 %	100 Hz	400 ms	-1,5 mm	1 mm	2 mm	10 bar
6 mm Baustahl	1500 W	50 %	100 Hz	1700 ms	0 mm	1 mm	2 mm	0,8 bar
3 mm Alumini- um	1500 W	CW	CW	1200 ms	-3,1 mm	0,7 mm	1,5 mm	10 bar

Tabelle 4.1.: Vergleich der optimalen Parameter für den Einstechprozess

Eine Reduktion der eingebrachten Laserenergie hat immer auch eine Reduktion des Durchmessers der oxidierten Zone auf der Blechunterseite zur Folge.

Der Durchmesser des Einstichs auf der Blechoberseite scheint von mehreren Parametern abzuhängen. Bei den Versuchen mit Aluminium zeigte sich, dass die Fokusslage einen großen Einfluss hat, da damit das vertikale Intensitätsprofil gesteuert werden kann. Das liegt an der Kaustik der Laserstrahlung. Wird der Fokus verschoben, ändert sich die Energiedichte in der Richtung der optischen Achse. Liegt der Fokus nahe der Oberseite des Blechs, wird das Material auf der Oberseite stärker erhitzt. Nahe der Unterseite ist die Energiedichte jedoch drastisch reduziert - es ist insgesamt sehr viel Energie notwendig um durchzustechen. Liegt der Fokus tiefer im Blech, ist die Energiedichte an der Blechunterseite höher - es kommt leichter zum Durchstich. Die Kaustik der Laserstrahlung führt jedoch zu größeren Strahldurchmessern auf der Blechoberseite. Dadurch kommt es zu größeren Durchmessern der Einstiche auf der Blechoberseite. Ein weiterer Faktor ist das Tastverhältnis. Entgegen den Erkenntnissen von ([11], S. 1113), wonach ein zehnpromtentes Tastverhältnis bei Einstichen in Baustählen zu den geringsten Durchmessern führt, hat sich bei den hier beschriebenen Versuchen ein Tastverhältnis von 50% als optimal herausgestellt. Bei den Versuchen mit 2 mm starkem Edelstahlblech zeigte sich, dass bei gleicher eingebrachter Laserenergie und gleicher Burstzeit, der Durchmesser an der Oberseite des Einstichs mit unterschiedlichen Tastverhältnissen zumindest leicht verändert werden kann. Dabei ist keineswegs davon auszugehen, dass ein geringeres Tastverhältnis (und damit eine geringere eingebrachte Laserenergie) auch kleinere Durchmesser an der Oberseite erzeugt. Dieses Phänomen könnte durchaus mit einer gewissen Dynamik im Schmelzbad des Einstichs zu erklären sein, jedoch ist eine Überprüfung dieses Phänomens nur mit einem geeigneten Messaufbau mit einer Hochgeschwindigkeitskamera möglich.

Die Durchmesser der Einstiche auf der Unterseite der Bleche sind ausnahmslos kleiner als die Durchmesser auf der Oberseite, weshalb eine Betrachtung dieser nicht notwendig erscheint. Auf den Oberseiten der Proben rekristallisiert immer ein Teil des Materials, das beim Einstichprozess aufgeschmolzen wurde. Das Volumen dieser rekristallisierten Schmelze hängt direkt von der Größe des Einstichs ab (Durchmesser und Blechstärke). Eine Reduktion dieses Volumens ist demnach nur möglich, indem Parameter für kleinere Einstichdurchmesser gefunden werden. Erwartungsgemäß legt sich bei Einstichen in Baustahl vergleichsweise wenig rekristallisierte

Schmelze auf der Oberfläche an. Es verbrennt ein großer Teil des aufgeschmolzenen Materials mit dem eingebrachten Sauerstoff.

4.1.4. Visualisierung

Die Visualisierung zeigt nun auf Wunsch die Einstich- und Schnittparameter aller untersuchten Materialien und Blechstärken an. In Abbildung [4.3](#) ist die Seite der Parameter für Edelstahl zu sehen. Im oberen Teil der Seite sind die Parameter für das Einstechen zu sehen und im unteren Teil für das Schneiden. Zur Veranschaulichung befindet sich im unteren Teil eine Grafik, welche die Zusammenhänge von „Standoff“, „Fokuslage“ und „Skalenmaß“ wiedergibt.

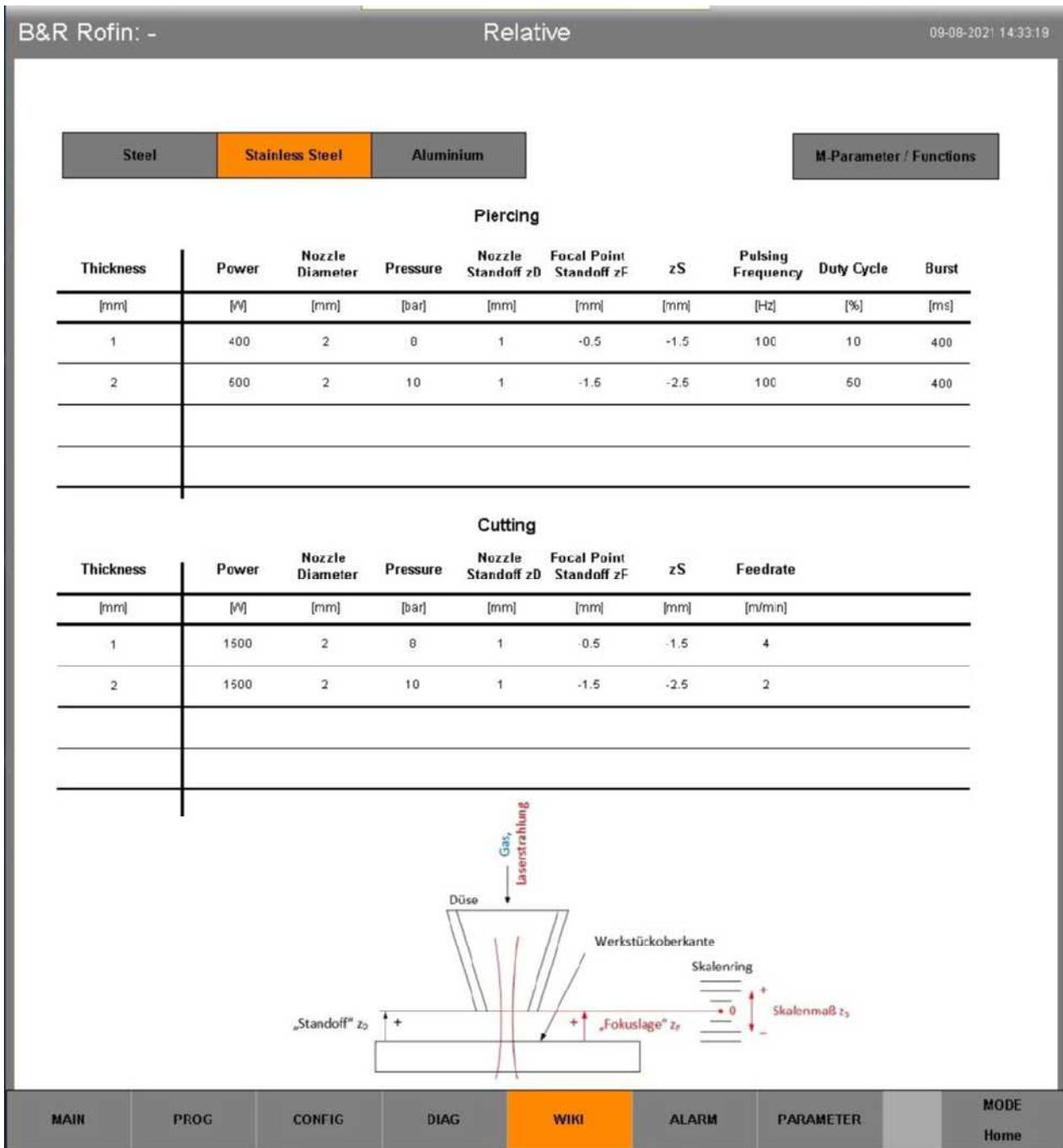


Abbildung 4.3.: Parameter-Ansicht für „Edelstähle“ des GUI der SPS

4.2. Ansätze für weitere Arbeiten

4.2.1. Untersuchung des Verhaltens der ausgeblasenen Schmelze

Bei der Untersuchung von Schnitten in 2 mm starkes Edelstahlblech fiel auf, dass es zur Gratbildung kommt. Mittels Kamera wurde die Unterseite der Bleche während des Schnittprozesses untersucht. Dabei wurde die ausgeblasene Schmelze immer wieder links und rechts der Schnittrichtung abgelenkt. Zumindest teilweise schien die Gratbildung mit der Ablenkung der Schmelze zusammenzuhängen. Der Verdacht besteht, dass bei der Ablenkung der Schmelze zu einer Seite, die Geschwindigkeit, mit der die Schmelze ausgeblasen wird, lokal sehr klein wird. Genau an diesen Stellen dürfte sich auch der Grat bilden, da die Energie der ausgeblasenen Teilchen nicht ausreicht, um die an der Seite der Schnittfuge anhaftende Schmelze zu lösen (siehe Abb. 4.4). Außerdem müsste geklärt werden, was die lokale Ablenkung der Schmelze auslöst. Als Ursache in Frage käme die Gasströmung unter dem Blech, oder auch Schwingungen der z-Achse der CNC-Verfahrenanlage und damit lokale Abkühlung durch das Wegbewegen des Laserstrahls.

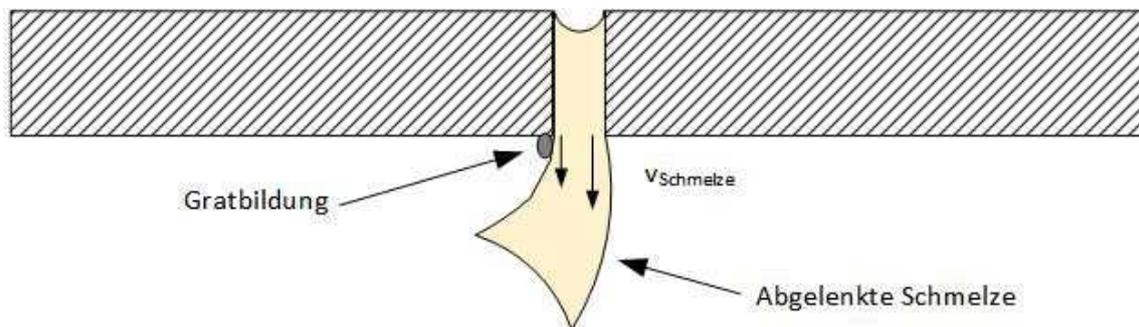


Abbildung 4.4.: Ausbildung eines Grates bei lokaler Verlangsamung der Schmelze

Nun könnte man mit einem entsprechenden Versuchsaufbau überprüfen, inwieweit diese Annahmen zutreffen. Geeignet dafür wäre eine Hochgeschwindigkeitskamera, mit der die Dynamik der Gratbildung deutlich besser dargestellt kann. Der in dieser Arbeit verwendete Versuchsaufbau, mit der planen Einspannung von Blechproben und einem großem Freiraum unter den Blechen, würde sich gut eignen. Wichtig zu beachten ist, dass die Belichtungszeit entsprechend angepasst wird und Filter verwendet werden, um ein klares, richtig belichtetes Bild von der Interaktion zwischen Schmelze und Grat zu bekommen.

Abbildungsverzeichnis

2.1. Übersicht der Anlage. V.l.n.r: Bedienpanel CNC-Verfahrenanlage, Bedienpanel Laser, Laser	6
2.2. Vom HAN-D-Stecker aufgelegte Adern im Schaltschrank der CNC-Verfahrenanlage	7
2.3. Übersicht über die alte Verkabelung des Lasers mit dem Beckhoff-Buskoppler	9
2.4. Rückseite des beweglichen Schaltschranks der SPS der CNC-Verfahrenanlage	10
2.5. Vorderseite des beweglichen Schaltschranks der SPS der CNC-Verfahrenanlage	11
2.6. B&R, „Logical View“ des AS-Projekts	12
2.7. B&R, „Actions“ des SW-Bausteins „SystemActions.st“	12
2.8. B&R, „Physical View“ der Ursprungs-SPS-Konfiguration	13
2.9. B&R, „Configuration View“ der Ursprungs-SPS-Konfiguration	14
2.10. Neuinstallation der Schnittstellen zum Laser im Schaltschrank des Lasers	15
2.11. Beschriftungen der Klemmen im Schaltschrank des Lasers	15
2.12. Harting-Stecker der Schnittstelle X71 des Lasers	18
2.13. Harting-Stecker der Schnittstelle X83 des Lasers	19
2.14. Klemmenstock, über den vor dem Umbau Ein- und Ausgänge des Lasers mit der SPS verbunden waren	21
2.15. Blick in den hinteren, oberen Bereich des Schaltschranks der SPS nach dem Umbau	21
2.16. Blick auf die SPS vor dem Umbau	23
2.17. Blick auf die SPS nach dem Umbau	24
2.18. Blick auf das Modul „X20BT9100“, das für die Kommunikation mit dem Handbediengerät zuständig ist, vor dem Umbau	25
2.19. Aufputzgehäuse zum Anschluss des Handbediengeräts	26
2.20. Klemme X12 im Schaltschrank der SPS	26
2.21. Neue Position des Handbediengeräts mit nebenliegendem, neuem Not-Aus-Taster	27
2.22. Klemme X8 im Schaltschrank der SPS vor dem Umbau	29
2.23. Klemmen X13 und X8 im Schaltschrank der SPS nach dem Umbau	30
2.24. Pulsprogrammanwahl-Ansicht des Laserbedienpanels	31
2.25. Ansicht des Laserpanels mit rot markiertem „Schlüsselschalter“	32
2.26. B&R, Ansicht des über POWERLINK mit der SPS verbundenen Gerätes (außer Motion)	33
2.27. B&R, Ansicht aller über X2X-Link mit dem Buskoppler verbundenen Karten	33
2.28. B&R, Hardwarebaum der SPS nach der Neukonfiguration	34
2.29. B&R, Initialisierungsdatei des CNC-Kernels der SPS, Definition der Bereiche für synchronisierte und unsynchronisierte M-Funktionen	35
2.30. B&R, Definition der Adressvariablen für M-Funktionen und M-Parameter	36
2.31. Infoleiste des GUI, des Bedienpanels der SPS	41
2.32. Teil der Main-Ansicht des GUI, des Bedienpanels der SPS	43
2.33. Wiki-Ansicht des GUI, des Bedienpanels der SPS	44
2.34. Parameter-Ansicht des GUI, des Bedienpanels der SPS	46

3.1. (vgl. [12], S. 26/3-1). Aufbau der Laserquelle der umgebauten Anlage	48
3.2. Verschluss und Absorber	49
3.3. (vgl. [2], S. 114). Überblick über Energieniveaus und Schwingungsformen eines CO_2 -Lasers	50
3.4. Aufsicht auf die Bearbeitungsdüse mit wichtigen Abständen	51
3.5. Einstiche in 1mm Edelstahlblech mit unterschiedlichen Fokusabständen	52
3.6. Ermittlung der Fokuslage über Einstich sechs	53
3.7. Errechnete Effektivleistung des Rohstrahls bei 100 % Leistung im CW-Betrieb	54
3.8. Primes. Intensitätsverteilung des Rohstrahls bei 10 %, CW	55
3.9. Primes. Schnitt durch Intensitätsverteilung des Rohstrahls bei 10 % CW	55
3.10. Primes. Intensitätsverteilung des Rohstrahls bei 100 %, CW	56
3.11. Primes. Schnitt durch Intensitätsverteilung des Rohstrahls bei 100 % CW	56
3.12. Positionierlaserpunkt bei $y=0$ mm	56
3.13. Positionierlaserpunkt bei $y=1170$ mm	56
3.14. Primes. Ergebnisse der Kaustikvermessung des fokussierten Laserstrahls bei 100 % Leistung	57
3.15. Überblick über Qualitätskriterien, bzw. Kenngrößen von Laserstrahlschnitten	59
3.16. (vgl. [11], S. 1113). Vergleich NPM und PRPM bei 100 Hz Pulsfrequenz	62
3.17. (vgl. [8], S. 6). Zusammenhang zwischen Einschaltzeit und Einstichzeit	62
3.18. (vgl. [8], S. 7). Zusammenhang zwischen Einschaltzeit und Einstichdurchmesser	63
3.19. CNC-Schneidanlage im Labor des Instituts	64
3.20. Probe 1.1, Unterseite, 1 mm 1.4307	67
3.21. Probe 1.1, Oberseite, 1mm 1.4307	68
3.22. Probe 1.7, Oberseite, 1 mm 1.4307	68
3.23. Probe 2.4, Oberseite, 1 mm 1.4307	69
3.24. Probe 2.4, Unterseite, 1 mm 1.4307	69
3.25. Probe 5.7, Unterseite, 1 mm 1.4307	70
3.26. Probe 7.7, Unterseite, 1 mm 1.4307	71
3.27. Probe 9.5, Oberseite, 1 mm 1.4307	72
3.28. Probe 9.5, Unterseite, 1 mm 1.4307	72
3.29. Schnitt mit $4000 \frac{mm}{min}$ Schnittgeschwindigkeit, Oberseite, 1 mm 1.4307	73
3.30. Schnitt mit $4000 \frac{mm}{min}$ Schnittgeschwindigkeit, Unterseite, 1 mm 1.4307	73
3.31. Probe 1.5, Oberseite, 2 mm 1.4307	74
3.32. Probe 1.5, Unterseite, 2 mm 1.4307	74
3.33. Probe 10.7, Oberseite, 2 mm 1.4307	76
3.34. Probe 11.7, Oberseite, 2 mm 1.4307	76
3.35. Probe 13.2, Oberseite, 2 mm 1.4307	76
3.36. Probe 13.6, Oberseite, 2 mm 1.4307	77
3.37. Probe 13.6, Unterseite, 2 mm 1.4307	77
3.38. Gratbildung an der Unterseite des 2 mm 1.4307 Blechs	78
3.39. Blick auf die Unterseite des Blechs, Proben 1.1-2.7	79
3.40. Beginn der Gratbildung bei Probe 1.1, 2 mm 1.4307	80
3.41. Blick von oben in die Fuge des Strahlabsorbers mit rekristallisierter Schmelze	81
3.42. Versuchsaufbau, Schraubstock mit 2 mm 1.4307 und Kamera	82
3.43. Blick auf die Unterseite der Proben 1 bis 4	82

3.44. Versuchsaufbau, Plane Einspannung, Kamera mit Schweißschutzglas und Crossjet	83
3.45. Blick auf die Unterseite der Probe 5	83
3.46. Einstich der Probe 5, 2 mm, 1.4307	84
3.47. Kameraaufnahme der Probe 4 ohne Ablenkung der Schmelze	84
3.48. Kameraaufnahme der Probe 4 mit Ablenkung der Schmelze in Schnittrichtung rechts	85
3.49. Probe 5, Ablenkung nach links	86
3.50. Probe 5, Ablenkung nach rechts	86
3.51. Probe 1, Oberseite, 6 mm Baustahl	87
3.52. Probe 1, Unterseite, 6 mm Baustahl	87
3.53. Probe 3, Oberseite, 6 mm Baustahl	87
3.54. Probe 3, Unterseite, 6 mm Baustahl	87
3.55. Probe 14.1, Oberseite, 6 mm Baustahl	90
3.56. Probe 14.1, Unterseite, 6 mm Baustahl	90
3.57. Probe 14.4, Oberseite, 6 mm Baustahl	90
3.58. Probe 14.4, Unterseite, 6 mm Baustahl	90
3.59. Probe 15.4, Oberseite, 6 mm Baustahl	91
3.60. Probe 15.4, Unterseite, 6 mm Baustahl	91
3.61. Probe 9.1, Oberseite, 3 mm Aluminium	93
3.62. Probe 9.1, Unterseite, 3 mm Aluminium	93
3.63. Einstich der Probe 12.1, 3 mm Aluminium	93
3.64. Probe 18.1, Oberseite, 3 mm Aluminium	95
3.65. Probe 18.1, Unterseite, 3 mm Aluminium	95
3.66. Probe 18.3, Oberseite, 3 mm Aluminium	95
3.67. Probe 18.3, Unterseite, 3 mm Aluminium	95
3.68. Probe 24.2, Oberseite, 3 mm Aluminium	96
3.69. Probe 24.2, Unterseite, 3 mm Aluminium	96
4.1. Mögliche Versteifung der y-Achse	98
4.2. Übersicht über die minimalen Einstichenergien, vor und nach der Optimierung	101
4.3. Parameter-Ansicht für „Edelstähle“ des GUI der SPS	104
4.4. Ausbildung eines Grates bei lokaler Verlangsamung der Schmelze	105

Tabellenverzeichnis

2.1. Vor dem Umbau mit dem Laser verbundene AS-Variable	8
2.2. B&R Geräte im Schaltschrank des Lasers nach dem Umbau	16
2.3. Schnittstellen des Lasers zur Kommunikation mit externen Quellen	19
2.4. Übersicht Klemme X400	20
2.5. An der SPS angeschlossene Module vor dem Umbau	22
2.6. An der SPS angeschlossene Module nach dem Umbau	23
2.7. Ersatzmodule nach dem Umbau	24
2.8. Aderbelegung Handbediengerät	28
2.9. Übersicht über das resultierende Tastverhältnis	31
2.10. Lasermodi des alten Lasers	36
2.11. Leistungsstellung nach dem Umbau	39
2.12. Minimale Tastverhältnisse	40
2.13. Einblendungen zum Zustand des Lasers in der Infoliste	42
2.14. Einblendungen zum Zustand des Verfahrenanlage in der Infoliste	42
3.1. Wärmeleitfähigkeiten der Bestandteile des Gasgemisches des CO ₂ -Lasers (vgl. [4], S. 339)	51
3.2. Parameter für die Fokusermittlung	52
3.3. Übersicht der Geräte des standardmäßigen Aufbaus	64
3.4. Übersicht der Materialien, mit denen Einstichversuche gemacht werden	65
3.5. Übersicht der Materialien, mit denen Schnittversuche gemacht werden	65
3.6. Übersicht über die für die Versuche relevanten Parameter	66
3.7. Fixe Parameter, Proben 1.1 bis 1.7, 1 mm 1.4307	67
3.8. Variable Parameter, Proben 1.1 bis 1.7, 1 mm 1.4307	67
3.9. Fixe Parameter, Proben 2.1 bis 2.7, 1 mm 1.4307	68
3.10. Variable Parameter, Proben 2.1 bis 2.7, 1 mm 1.4307	68
3.11. Fixe Parameter, Proben 3.1 bis 6.7, 1 mm 1.4307	69
3.12. Variable Parameter, Proben 3.1 bis 6.7, 1 mm 1.4307	69
3.13. Fixe Parameter, Proben 7.1 bis 7.7, 1 mm 1.4307	70
3.14. Variable Parameter, Proben 7.1 bis 7.7, 1 mm 1.4307	70
3.15. Fixe Parameter, Proben 7.1 bis 7.7, 1 mm 1.4307	71
3.16. Variable Parameter, Proben 8.1 bis 9.7, 1 mm 1.4307	71
3.17. Optimale Parameter, Einstich in 1 mm 1.4307	72
3.18. Vergleich der minimalen Einstichleistungen, 1 mm 1.4307	72
3.19. Optimale Parameter, Schnitte in 1 mm 1.4307	73
3.20. Fixe Parameter, Proben 1.1 bis 1.7, 2 mm 1.4307	73
3.21. Variable Parameter, Proben 1.1 bis 1.7, 2 mm 1.4307	74
3.22. Fixe Parameter, Proben 2.1 bis 4.7, 2 mm 1.4307	74
3.23. Variable Parameter, Proben 2.1 bis 4.7, 2 mm 1.4307	74
3.24. Fixe Parameter, Proben 5.1 bis 8.7, 2 mm 1.4307	75
3.25. Variable Parameter, Proben 5.1 bis 8.7, 2 mm 1.4307	75

3.26. Fixe Parameter, Proben 9.1 bis 13.7, 2 mm 1.4307	75
3.27. Variable Parameter, Proben 9.1 bis 13.7, 2 mm 1.4307	76
3.28. Optimale Parameter, Einstich in 2 mm 1.4307	77
3.29. Vergleich der minimalen Einstichleistungen, 2 mm 1.4307	77
3.30. Fixe Parameter, Proben 1.1 bis 2.7, 2 mm 1.4307	78
3.31. Variable Parameter, Proben 1.1 bis 2.7, 2 mm 1.4307	79
3.32. Schnittparameter, Proben 1 bis 5, 2 mm 1.4307	81
3.33. Fixe Parameter, Proben 1.1 bis 3.7, 6 mm Baustahl	87
3.34. Fixe Parameter, Proben 5.1 bis 6.7, 6 mm Baustahl	88
3.35. Variable Parameter, Proben 5.1 bis 6.7, 6 mm Baustahl	88
3.36. Fixe Parameter, Proben 8.1 bis 13.7, 6 mm Baustahl	88
3.37. Variable Parameter, Proben 8.1 bis 13.7, 6 mm Baustahl	89
3.38. Fixe Parameter, Proben 14.1 bis 14.7, 6 mm Baustahl	89
3.39. Variable Parameter, Proben 14.1 bis 14.7, 6 mm Baustahl	89
3.40. Fixe Parameter, Proben 15.1 bis 15.7, 6 mm Baustahl	90
3.41. Variable Parameter, Proben 15.1 bis 15.7, 6 mm Baustahl	90
3.42. Optimale Parameter, Einstich in 6 mm Baustahl	91
3.43. Fixe Parameter, Proben 1.1 bis 9.7, 3 mm Aluminium	92
3.44. Variable Parameter, Proben 1.1 bis 9.7, 3 mm Aluminium	92
3.45. Fixe Parameter, Proben 13.1 bis 18.7, 3 mm Aluminium	94
3.46. Variable Parameter, Proben 13.1 bis 18.7, 3 mm Aluminium	94
3.47. Fixe Parameter, Proben 23.1 bis 24.7, 3 mm Aluminium	95
3.48. Variable Parameter, Proben 23.1 bis 24.7, 3 mm Aluminium	95
3.49. Optimale Parameter, Einstich in 3 mm Aluminium	96
4.1. Vergleich der optimalen Parameter für den Einstechprozess	102

Literatur

- [1] Bernecker und Rainer: *Softwarehandbuch*. 2004.
- [2] Dohlus, R.: *Lasertechnik*. De Gruyter, 2015.
- [3] Eichler, H. und Eichler, J.: *Laser, Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. 8. Aufl. Springer Vieweg, 2015.
- [4] Langeheinecke, K. et al.: *Thermodynamik für Ingenieure*. Springer Vieweg, 2017.
- [5] Linde: *Produktdatenblatt Lasermix 690*. 2021.
- [6] Pocorni, J.: "Laser Cutting and Piercing: Experimental and Theroretical Investigation". Diss. Lulea University of Technology, 2017.
- [7] Pocorni, J. et al.: "Dynamic laser piercing of thick section metals", *Optics and Lasers in Engineering* 100 (2018). URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2017.07.012>
- [8] Pocorni, J. et al.: "Investigation of the piercing process in lasercutting of stainless steel", *Journal of Laser Applications* 29, 022201 (2017). URL: <https://doi.org/10.2351/1.4983260>
- [9] Poprawe, R.: *Lasertechnik für die Fertigung*. Berlin: Springer, 2005.
- [10] PRC: *Cutting parameters*. 7. März 2001. URL: <http://www.prclaser.com/cgi-bin> (besucht am 07.03.2001).
- [11] Rao, B. T., Ittoop, M. und Kukreja, L.: "A power ramped pulsed mode laser piercing technique for improved CO2 laser profile cutting", *Optics and Lasers in Engineering* 47 (2009). URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.07.003>
- [12] Rofin: *Betriebsanleitung Rofin DC015 CO2-Slab-Laser*. 2002.
- [13] Uchtmann, H.: "Modulares hybrides Laserstrahlbohren". Diss. RWTH Aachen, 2016.

A. Anhang

A.1. Stromlaufplan, Klemmenplan

Der Stromlaufplan bezieht sich ausschließlich auf neu verkabelte Anlagenteile der SPS und des Lasers. Die vor dem Umbau bereits bestehende Verkabelung ist in einem eigenen Stromlaufplan erfasst. Dieser wurde nicht bearbeitet.

Alle für die Kommunikation mit der B&R-Steuerung neu eingefügten Klemmen heißen X9xy

Kabelfarben

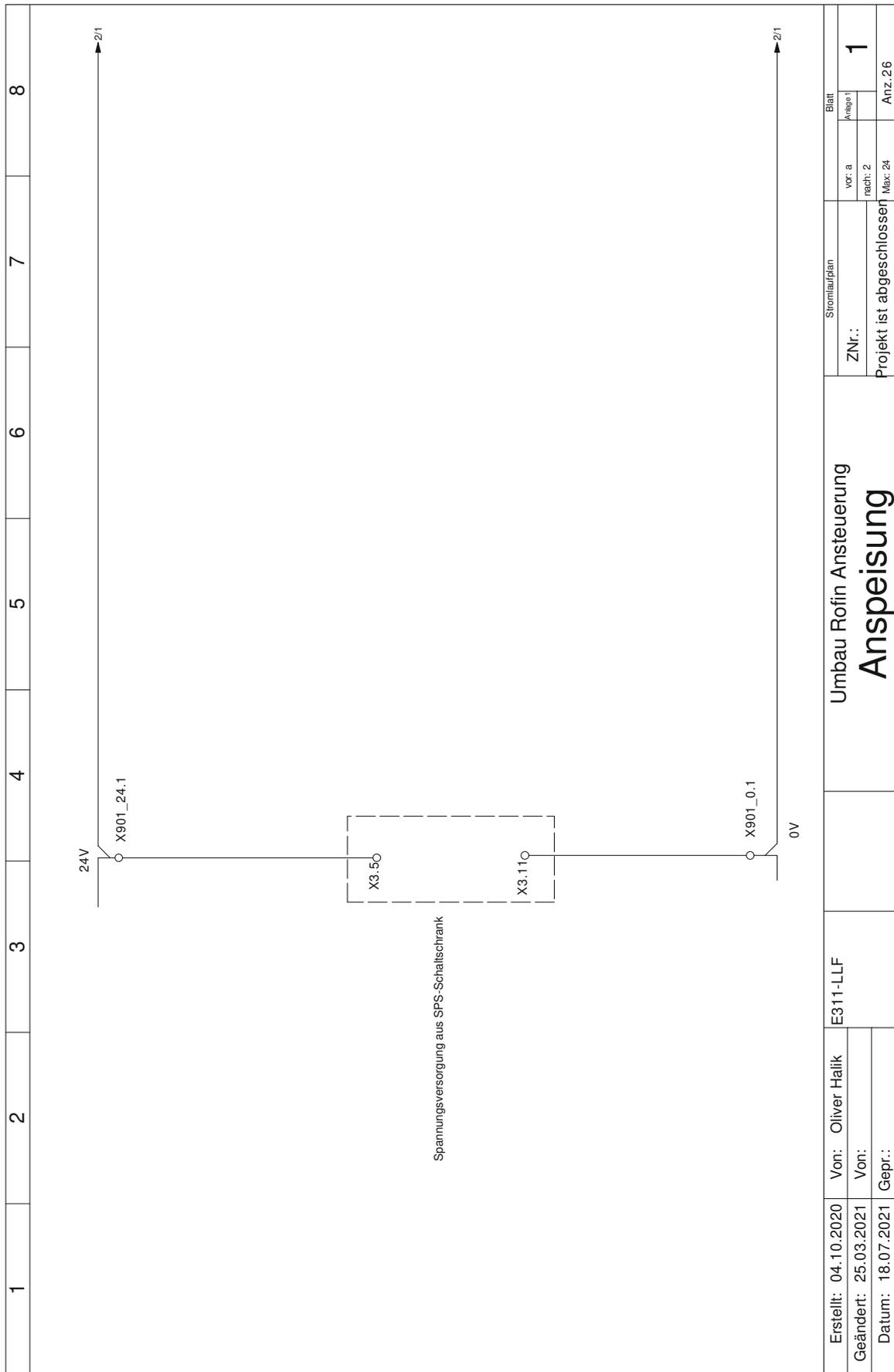
Steuerung 24V DC	
24V	braun
0V	(dunkel) blau
Signale	schwarz
	bk

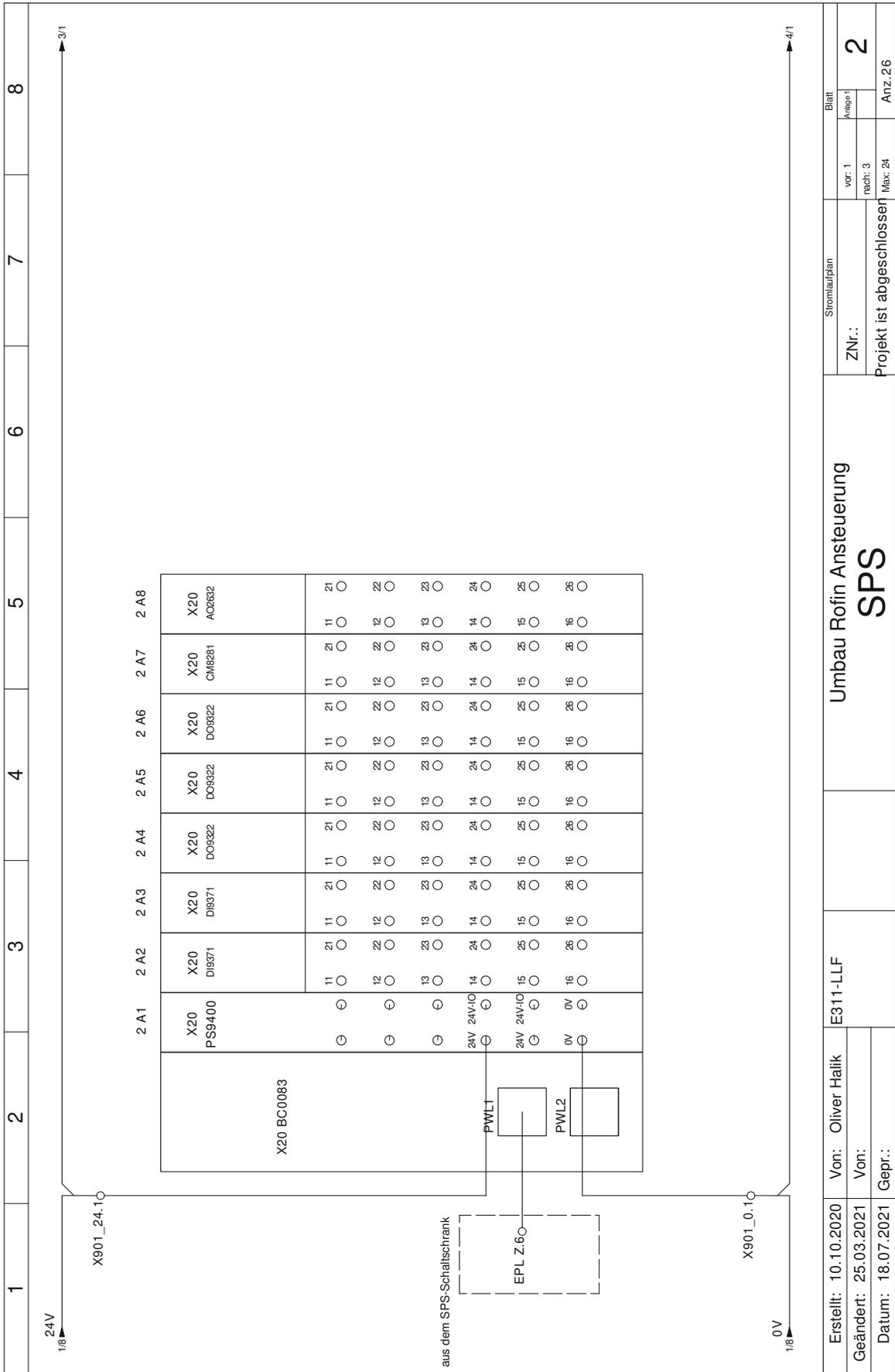
nicht spezifizierte Kabelquerschnitte 0,75mm²

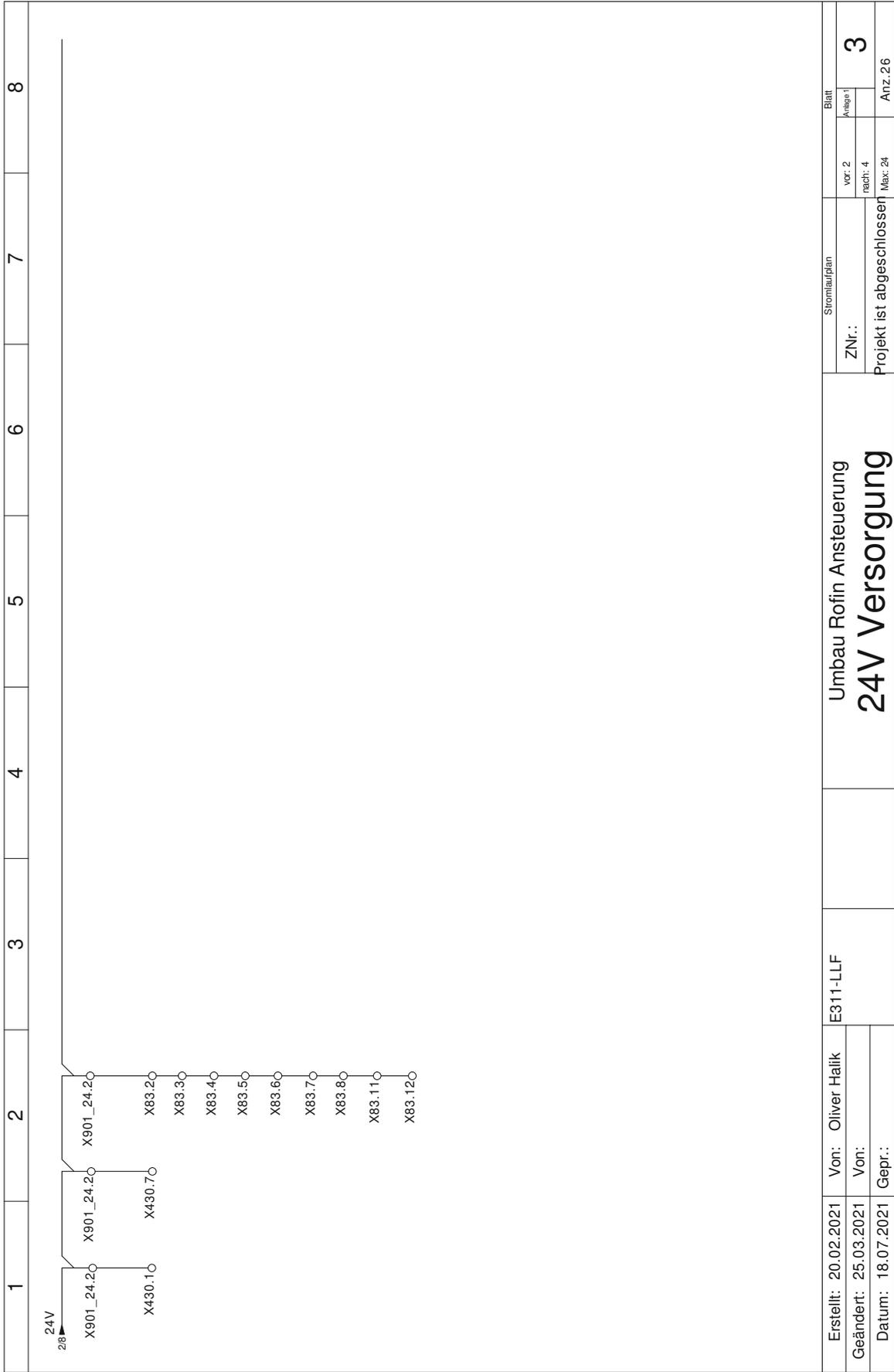
Stromlaufplan

Projekt: Umbau Rofin Ansteuerung

Kunde: TU Wien E311-LLF

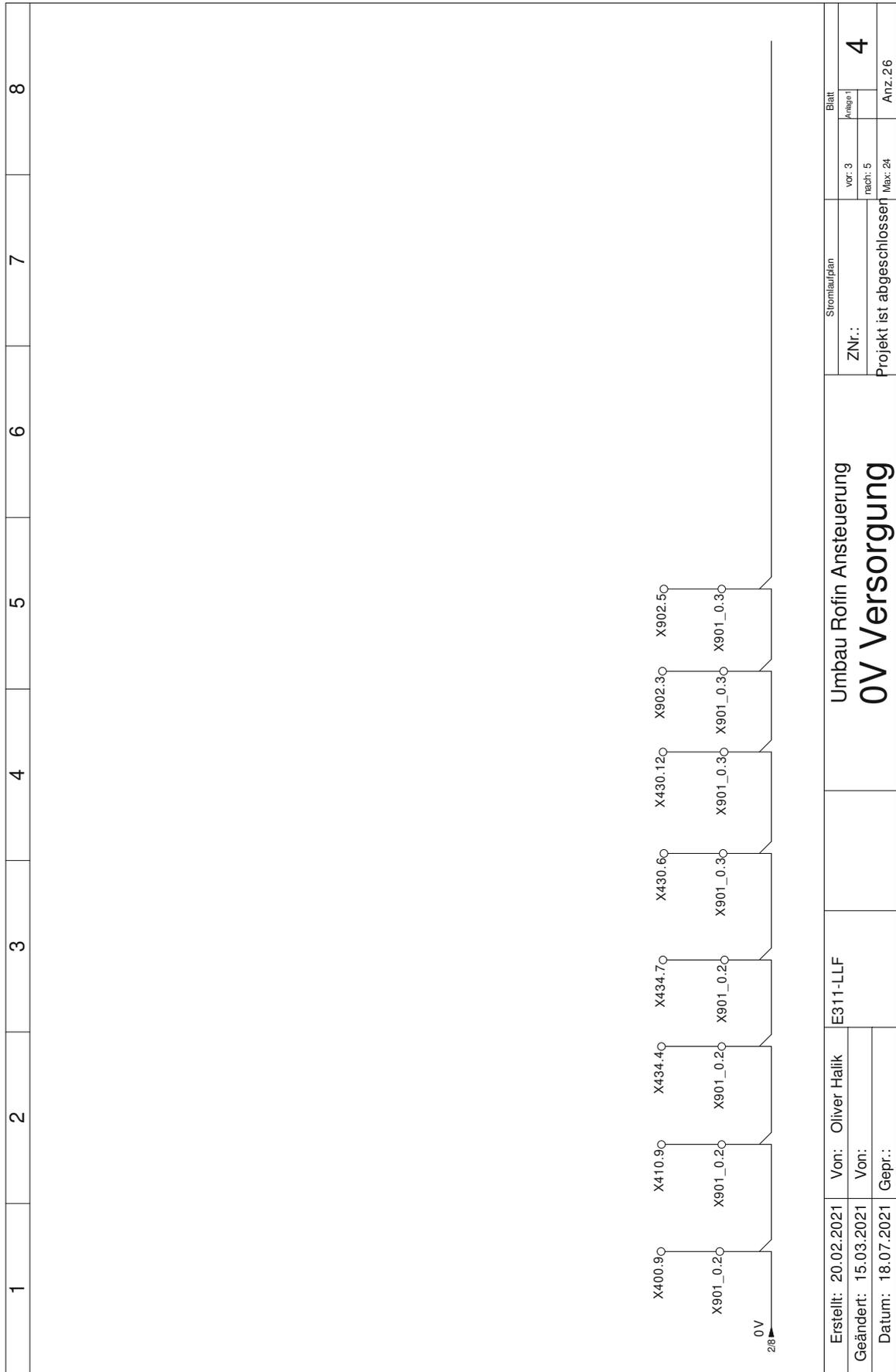


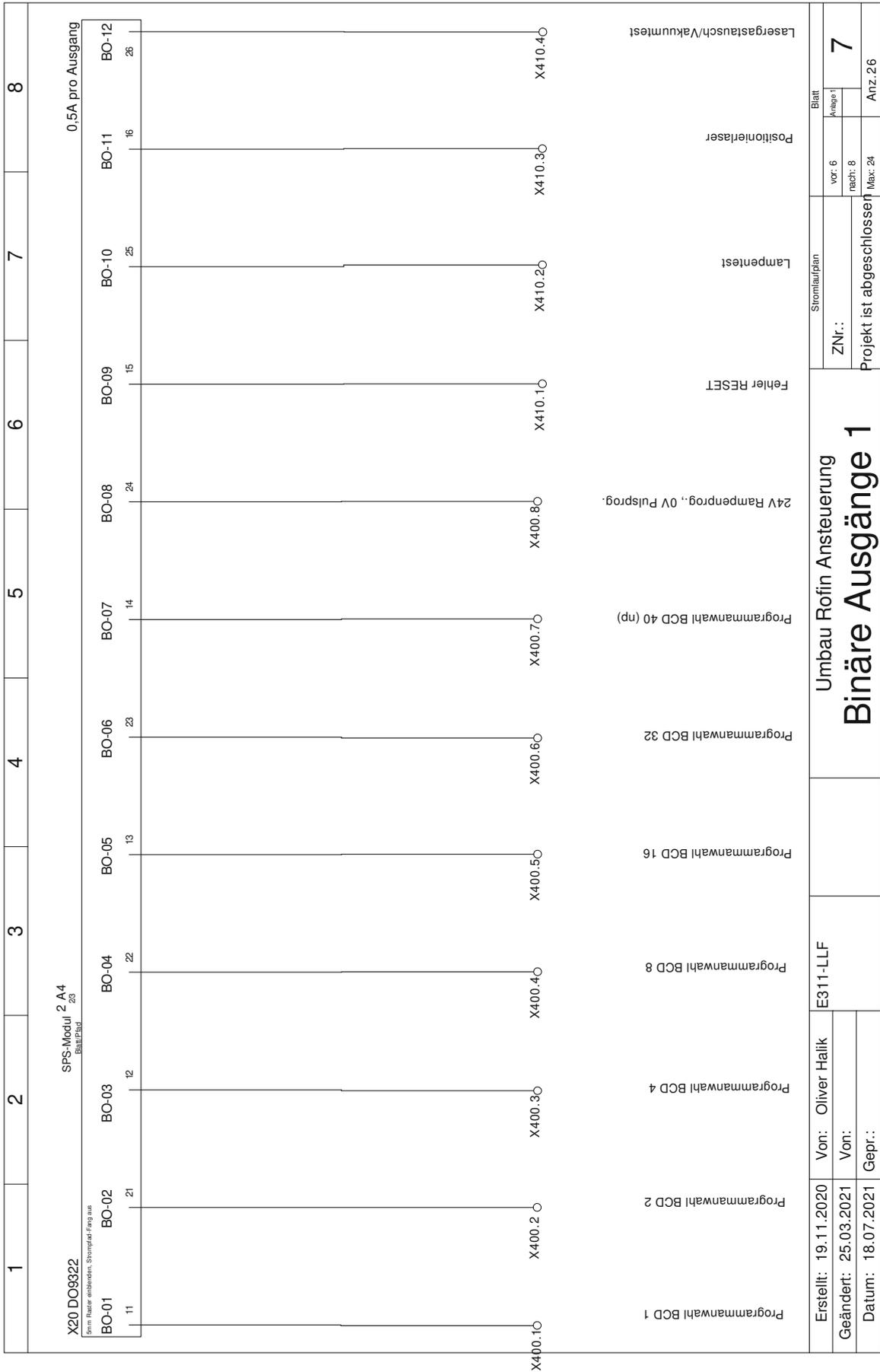




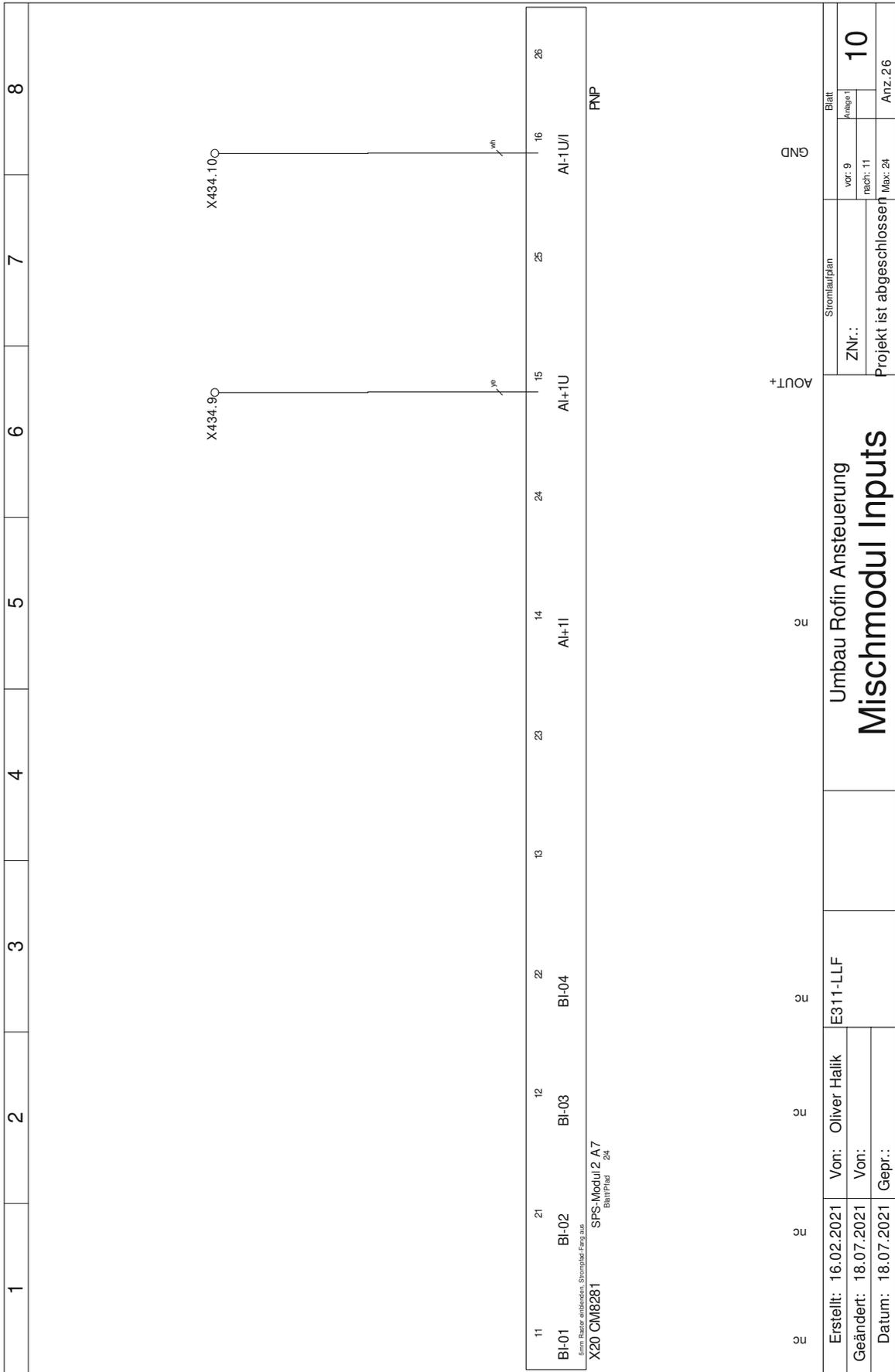
Erstellt: 20.02.2021	Von: Oliver Halik	E311-LLF	
Geändert: 25.03.2021	Von:		
Datum: 18.07.2021	Gepr.:		

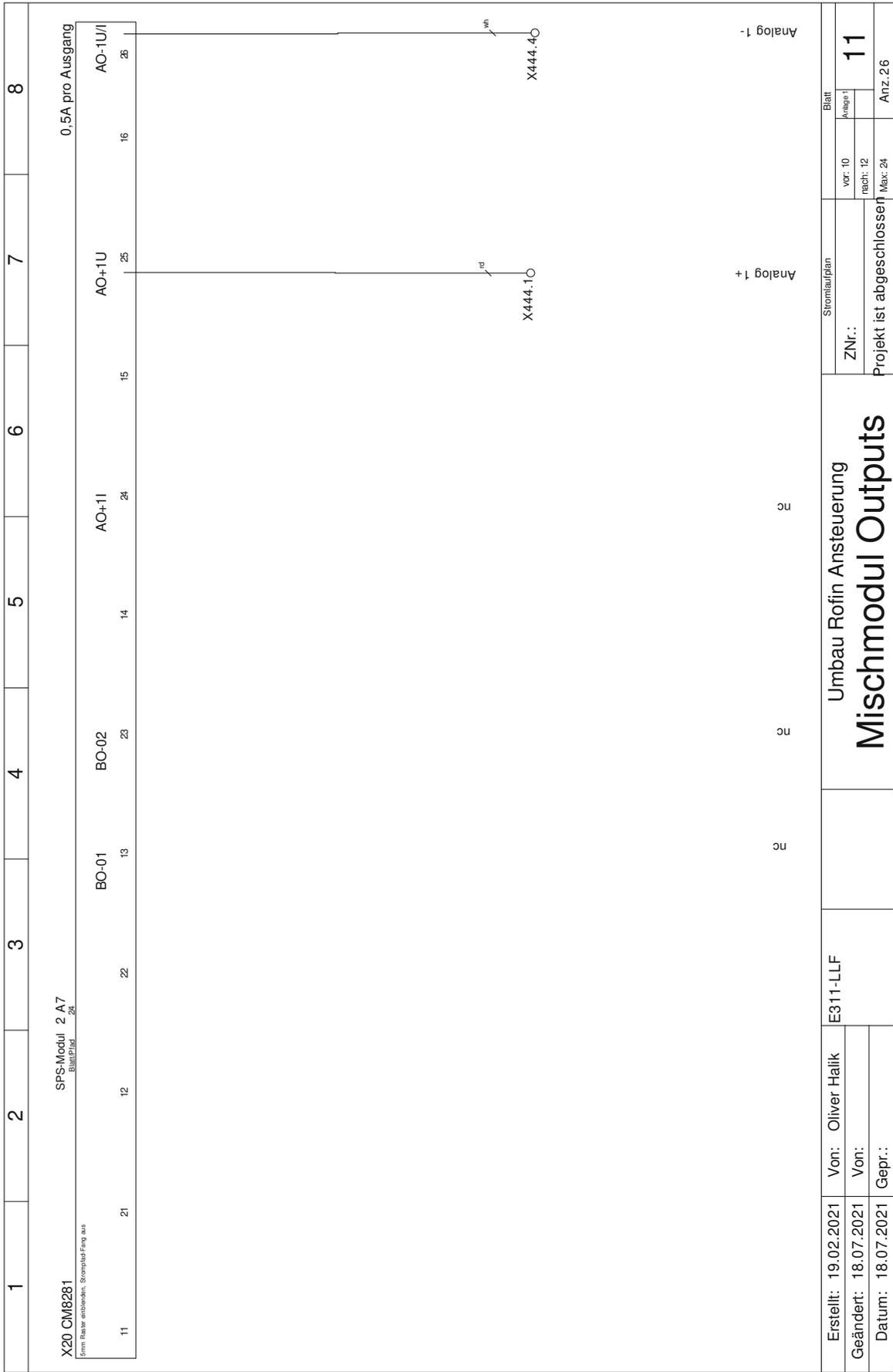
Umbau Rofin Ansteuerung 24V Versorgung	Blatt ZNr.: Projekt ist abgeschlossen Max: 24 Anz. 26
---	---

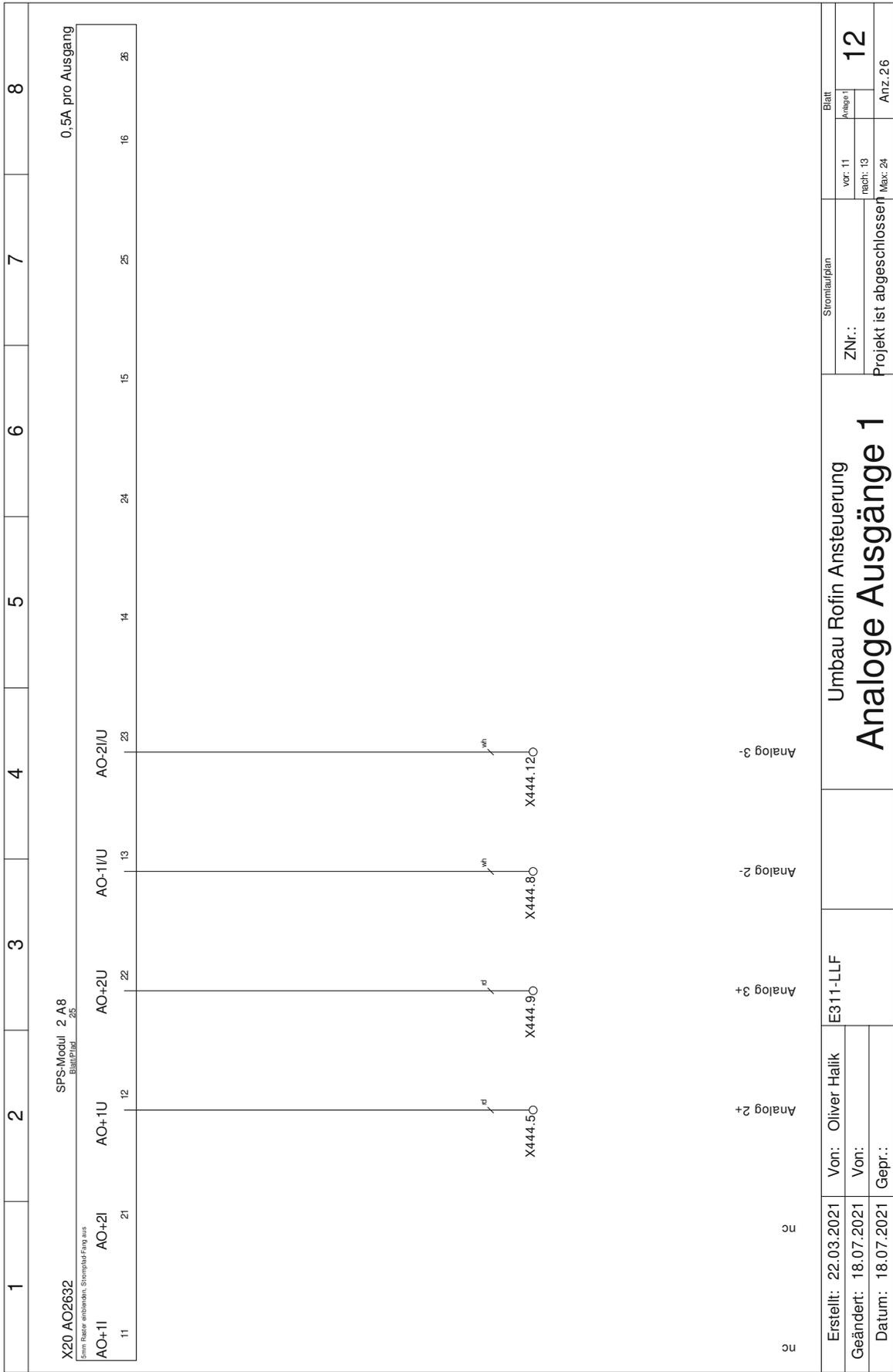


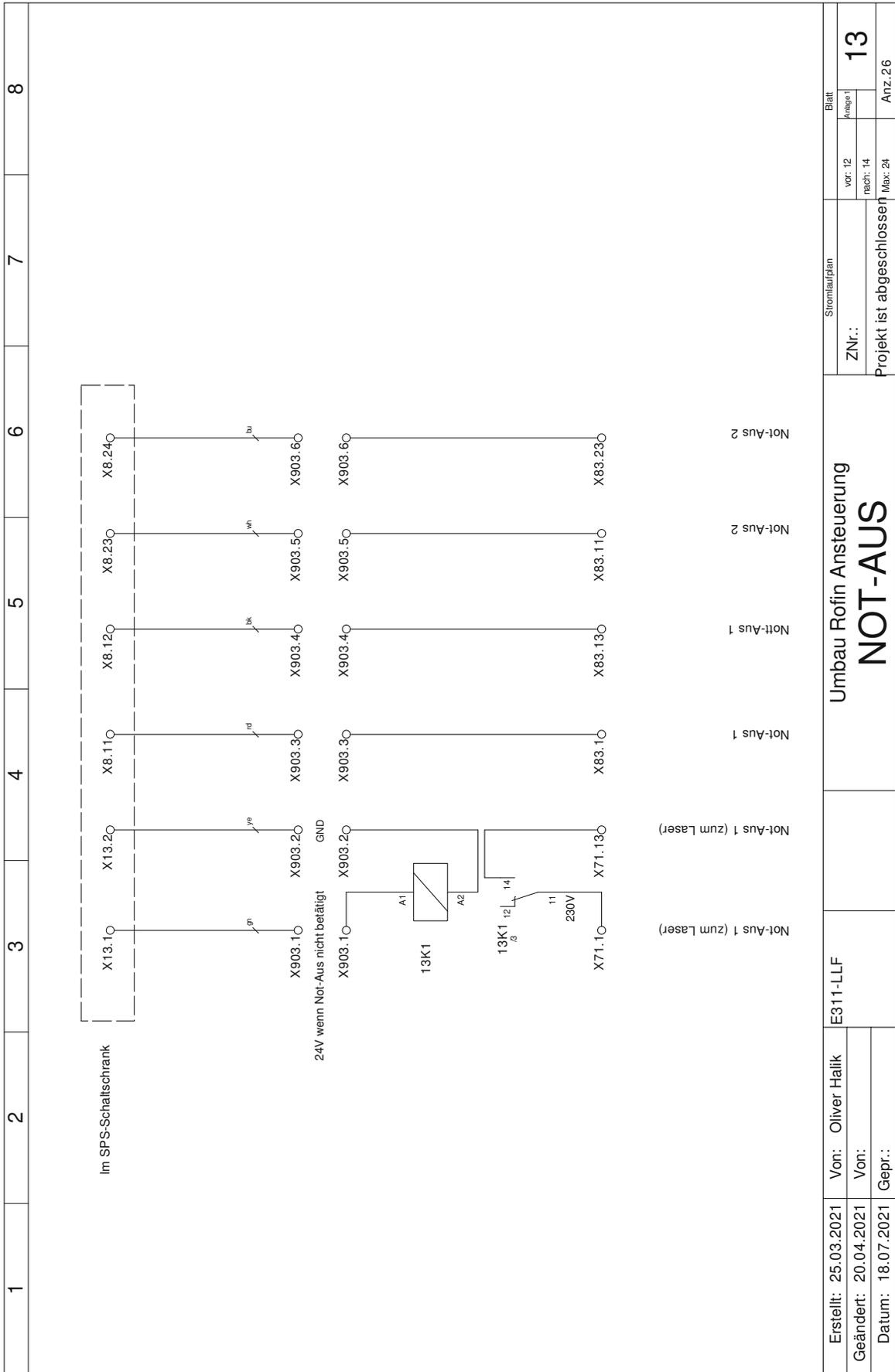


1	2	3	4	5	6	7	8																								
<p>X20 DO9322 SPS-Modul Beispiel</p> <p>0,5A pro Ausgang</p> <table border="1"> <tr> <td>BO-01</td> <td>BO-02</td> <td>BO-03</td> <td>BO-04</td> <td>BO-05</td> <td>BO-06</td> <td>BO-07</td> <td>BO-08</td> <td>BO-09</td> <td>BO-10</td> <td>BO-11</td> <td>BO-12</td> </tr> <tr> <td>11</td> <td>21</td> <td>12</td> <td>22</td> <td>13</td> <td>23</td> <td>14</td> <td>24</td> <td>15</td> <td>25</td> <td>16</td> <td>26</td> </tr> </table>								BO-01	BO-02	BO-03	BO-04	BO-05	BO-06	BO-07	BO-08	BO-09	BO-10	BO-11	BO-12	11	21	12	22	13	23	14	24	15	25	16	26
BO-01	BO-02	BO-03	BO-04	BO-05	BO-06	BO-07	BO-08	BO-09	BO-10	BO-11	BO-12																				
11	21	12	22	13	23	14	24	15	25	16	26																				
20	20	20	20	20	20	20	20																								
<p>Erstellt: 15.02.2021 Von: Oliver Halik</p> <p>Geändert: 15.03.2021 Von:</p> <p>Datum: 18.07.2021 Gepr.:</p>																															
<p>Stromlaufplan</p> <p>ZNr.: 9</p> <p>Projekt ist abgeschlossen</p> <p>Max: 24 Anz. 26</p>																															
<p>Umbau Rofin Ansteuerung</p> <p>Binäre Ausgänge 3</p>																															









Erstellt: 25.03.2021	Von: Oliver Halik	E311-LLF	Umbau Refin Ansteuerung	NOT-AUS	Stromlaufplan	Blatt
Geändert: 20.04.2021	Von:				ZNr.:	vor: 12 nach: 14
Datum: 18.07.2021	Gepr.:				Projekt ist abgeschlossen	Max: 24
						Anz. 26

