



Hochschule für Angewandte

Wissenschaften Hamburg

Fachbereich

Maschinenbau und Produktion



**HELMUT SCHMIDT
UNIVERSITÄT**

Universität der Bundeswehr Hamburg

Bachelorthesis in Kooperation mit

der Helmut Schmidt Universität /

Universität der Bundeswehr Hamburg

**Entwicklung und Implementierung einer
gemeinsamen Steuerung für
Mikrobearbeitungseinheit und Bearbeitungslaser im
Rahmen des Square Foot Manufacturings**

Verfasser: Alp-Muhlis Dere

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schulz

2. Prüfer: Dipl.-Wi.-Ing. Peter Kohrs

Hamburg, den 30.07.2010

Erklärung zur selbständigen Bearbeitung einer ausgeführten Bachelorthesis

Zur Erläuterung des Zwecks dieses Blattes:

§ 16 Abs. 5 der APSO-TI-BM lautet:

„Zusammen mit der Thesis ist eine schriftliche Erklärung abzugeben, aus der hervorgeht, dass die Arbeit – bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit (§18 Absatz 1) – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann - auch nachträglich - zur Ungültigkeit der Bachelor-Abschlusses führen.

Erklärung

Hiermit versichere ich,

Name: **Dere**

Vorname: **Alp-Muhlis**

dass ich die vorliegende mit dem Thema:

**Entwicklung und Implementierung einer gemeinsamen Steuerung für
Mikrobearbeitungseinheit und Bearbeitungslasers im Rahmen des Square Foot
Manufacturings**

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

Ort

Datum

Unterschrift im Original

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei denen Bedanken, die in jeglicher Form zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Zunächst bedanke ich mich bei meinem Erstprüfer von Seiten der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Herrn Prof. Dr.-Ing Wolfgang Schulz und dem gesamten Team des Laboratoriums Fertigungstechnik an der Helmut Schmidt Universität.

Desweiteren möchte ich mich bei meinem Zweitprüfer von der Helmut Schmidt Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, Herrn Dipl. – Wi.- Ing. Peter Kohrs bedanken, der immer ein offenes Ohr für mich hatte, stets kritische Anmerkungen beitrug und durch das Gegenlesen dieser Arbeit zu deren Gelingen beigetragen hat.

Zu guter Letzt danke ich meiner Familie, meinen Freunden und meiner Freundin, die mich während dieser Zeit unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung.....	1
2 Stand des Wissens und der Technik.....	3
2.1 Square Foot Manufacturing.....	3
2.1.1 Ausgangssituation.....	3
2.1.2 Konzept.....	5
2.1.3 Vorschubeinheit.....	7
2.2 Methoden der Software-Technik.....	11
2.2.1 Strukturierte Analyse - Datenflussdiagramm.....	11
2.2.2 Ablaufstruktur.....	17
2.2.3 Vergleich und Auswahl der Methodik.....	25
3 Entwicklung und Implementierung der Lasersteuerung.....	26
3.1 Problemstellung.....	26
3.2 Entwicklung der Lasersteuerung.....	28
3.2.1 Randbedingung.....	29
3.2.2 Hauptprogramm.....	30
3.2.3 Elemente auslesen.....	32
3.2.4 Prüfen.....	34
3.2.5 Laserstrahlung.....	36
3.3 Steuerungsversion der Vorschubeinheit.....	38
3.4 Implementierung der Lasersteuerung.....	40
3.4.1 Elemente auslesen.....	40
3.4.2 Prüfen.....	41

3.4.3	Funktionsmodul.....	42
3.4.4	Synchronisation	44
3.4.5	Schreiben.....	48
3.4.6	Frontpanel.....	49
4	Versuch	51
4.1	Prinzipieller Versuchsaufbau	51
4.1.1	National Instruments	52
4.1.2	Festkörperlaser	53
4.1.3	Vorschubeinheit	55
4.2	Versuchsdurchführung und -auswertung.....	56
4.2.1	Vordimensionierung	56
4.2.2	Optimale Einstellparameter – Laserpunkt	59
4.2.3	Optimale Einstellparameter mit Vorschubeinheit	61
4.2.4	Optimierung der Anzahl der Laserpunkt bei Linien	63
4.2.5	Erprobung im Dauer- und Taktbetrieb.....	65
5	Zusammenfassung.....	69
6	Quellenverzeichnis	70
6.1	Literaturverzeichnis	70
6.2	Internetquellen.....	74
7	Anhang.....	77
7.1	Tabellarische Auflistung zur Ermittlung des Laserpunktes	77
7.2	Tabellarische Auflistung zur Anzahl der Laserpunkte und Gerade.....	78

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Anwendungsbereich des Mikrosystemtechniks [OTT04, MES04].....	1
Abbildung 2.1: Werkstückgröße in der Mikrotechnik [LEH08].....	3
Abbildung 2.2: Maschinen-/Werkstückvolumenverhältnis [WUL09].....	4
Abbildung 2.3: Square Foot Manufacturing [WUL08b]	5
Abbildung 2.4: Baustellenfertigung [WUL08b]	6
Abbildung 2.5: Werkstattfertigung [WUL08a].....	7
Abbildung 2.6: Komponenten einer Vorschubeinheit.....	7
Abbildung 2.7: Prinzipielle Darstellung eines Piezoaktors [WAN06].....	8
Abbildung 2.8: Festkörpergelenk mit kreisförmiger Einkerbung [KÄM09].....	9
Abbildung 2.9: Vorschubeinheit: schematisch (links), aktuell (rechts) [KOH10].....	9
Abbildung 2.10: Darstellung des Arbeitsraums [FRE09].....	10
Abbildung 2.11: grafische Symbole in Datenflussdiagrammen [RAA92]	12
Abbildung 2.12: Modellhierarchie des Datenflussdiagramms [STO93; RAA92].....	13
Abbildung 2.13: Kontextdiagramm [SCH90]	14
Abbildung 2.14: 0. Ebene "Erfassen Aufträge" [SCH90].....	14
Abbildung 2.15: Virtuelle Bedienoberfläche zur Dreiecksberechnung [GEO07]	15
Abbildung 2.16: Kontextdiagramm in LabVIEW [GEO07].....	15
Abbildung 2.17: Teilprozess " Seiten- und Winkelberechnung" [GEO07]	16
Abbildung 2.18: "Rabattberechnung" [BOH77].....	19
Abbildung 2.19: Typische Phasen der Software-Entwicklung [MÜT09]	20
Abbildung 2.20: Hauptprogramm [STO93]	22
Abbildung 2.21: Unterprogramme [STO93]	23
Abbildung 2.22: Erzeugen einer Sinuskurve im Fall a) FALSE / b) TRUE [GEO07].	24
Abbildung 3.1: Ist-Zustand.....	27
Abbildung 3.2: Soll-Zustand.....	28
Abbildung 3.3: Schematische Darstellung eines Festkörperlasers [NEP09].....	29
Abbildung 3.4: Betriebsarten eines Lasers [HER10].....	30
Abbildung 3.5: Hauptprogramm der Lasersteuerung.....	31
Abbildung 3.6: VE-Steuerung via Programmablaufplan [RAN10]	38
Abbildung 3.7: Frontpanel der Vorschubeinheit-Steuerung [RAN10].....	39
Abbildung 3.8: Koordinateneingabe der Vorschubeinheit- und Lasersteuerung	40

Abbildung 3.9: "Laser an/aus" (links)/"Anzahl der Pulse" (rechts)	41
Abbildung 3.10: Modul "Prüfen" im Blockdiagramm	41
Abbildung 3.11: Fehlertypen.....	42
Abbildung 3.12: Rampenfunktion (links)/Kreiskoordinatenfunktion (rechts).....	43
Abbildung 3.13: Taktbetrieb: Laser an (links)/Laser aus (rechts).....	43
Abbildung 3.14: Dauerbetrieb: Laser an (links)/Laser aus (rechts).....	43
Abbildung 3.15: Synchronisations-Array beim Dauerbetrieb	45
Abbildung 3.16: Synchronisations-Array beim Taktbetrieb	46
Abbildung 3.17: Ausschnitt des Sub-Moduls "PI-Werte duplizieren".....	46
Abbildung 3.18: Frontpanel "PI-Werte duplizieren"	47
Abbildung 3.19: Ausschnitt des Sub-Moduls "Laserwerte duplizieren"	47
Abbildung 3.20: Frontpanel "Laserwerte duplizieren"	48
Abbildung 3.21: Schreibvorgang im Dauerbetrieb	48
Abbildung 3.22: Schreibvorgang im Taktbetrieb	49
Abbildung 3.23: Frontpanel der VE-und Lasersteuerung.....	49
Abbildung 4.1: Prinzipieller Versuchsaufbau	52
Abbildung 4.2: NI-cDAQ-9172 Chassis von National Instruments	53
Abbildung 4.3: Ytterbium Faser Laser der Firma IPG Laser GmbH.....	54
Abbildung 4.4: Verkabelung zwischen NI Modul 9263 und Festkörperlaser	54
Abbildung 4.5: Piezocontroller der Firma Physik Instrumente	55
Abbildung 4.6: Mikrobearbeitungseinheit mit Laseroptik und Werkstückträger.....	55
Abbildung 4.7: Werkstückträger mit Metallblech.....	59
Abbildung 4.8: Erzeugte Laserpunkte bei 40-facher Vergrößerung	60
Abbildung 4.9: gepunkteten Linie bei 25-facher Vergrößerung-10 LP-Länge 1,9mm Schreibfrequenz a) 1000Hz b) 100 Hz	62
Abbildung 4.10: Linie im Dauerbetrieb bei 25-facher Vergrößerung Schreibfrequenz: a) 100 Hz – b) 200 Hz	63
Abbildung 4.11: Erzeugung von gepunkteten Linien bei 25-facher Vergrößerung....	64
Abbildung 4.12: Raute bzw. Arbeitsraum im a) Taktbetrieb und b) Dauerbetrieb	66
Abbildung 4.13: Pfeil und Halbe Pfeile in a) und b) Taktbetrieb und c) Dauerbetrieb	67
Abbildung 4.14: Quadrat in Raute a) Taktbetrieb b) Dauerbetrieb.....	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Sinnbilder für Programmablaufpläne nach [DIN 66001].....	18
Tabelle 2.2: Sinnbilder nach Nassi und Shneidermann nach [DIN 66261]	21
Tabelle 2.3: Vergleich der drei Darstellungsmethoden	25
Tabelle 3.1: Unterprogramm "Auslesen" mit den dazugehörigen Funktionen.....	33
Tabelle 3.2: Unterprogramm "Prüfen" mit den dazugehörigen Funktionen.....	35
Tabelle 3.3: "Laserstrahlung" mit den dazugehörigen Funktionen.....	37
Tabelle 3.4: Synchronisations-Array beim Dauerbetrieb	44
Tabelle 3.5: Synchronisations-Array beim Taktbetrieb	45
Tabelle 4.1: Energiedichte im Fokus des Ytterbium Faser Lasers.....	58
Tabelle 4.2: Messung der Laserpunkte bei konstanter Spannung von 1,2 V.....	60
Tabelle 4.3: Eingangswerte für die erste Versuchsreihe	61
Tabelle 4.4: Messung beim Dauerbetrieb	63
Tabelle 4.5: Messung der gepunkteten Linien	65

Abkürzungsverzeichnis

A/D	Analog-Digital
CASE	Computer Aided Software Engineering
DAQ	Data Acquisition
DFD	Datenflussdiagramm
DIN	Deutsches Institut für Normung
FEM	Finite Elemente Methode
FKL	Festkörperlaser
LabVIEW	L aboratory V irtual I nstrumentation E ngineering W orkbench
LaFT	Laboratorium Fertigungstechnik
LASER	L ight A mplification by S timulated E mission of R adiation
MBE	Mikrobearbeitungseinheit
NI	National Instruments
PAP	Programmablaufplan
SA	Struktur Analyse
SFF	Square Foot Factory
SFM	Square Foot Manufacturing
STG	Struktogramm
USB	Universal Serial Bus
VE	Vorschubeinheit
VI	Virtual Instrument
WEZ	Wärmeeinflusszone
WST	Werkstück
WZ	Werkzeug
WZM	Werkzeugmaschine
YFL	Ytterbium Faser Laser

1 Einleitung

Die Mikrosystemtechnik (MST), die laut [BRU06] als „Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts“ bezeichnet wird, nimmt unter anderem Einfluss auf die Mikrotechnik. Die MST ist ein Oberbegriff für die Herstellung und Entwicklung von Mikrosystemen. Dabei verknüpft die MST die elektrischen, maschinellen, optischen, chemischen, biologischen, magnetischen oder anderen Eigenschaften (siehe Abbildung 1.1) [BRU07, MES04].

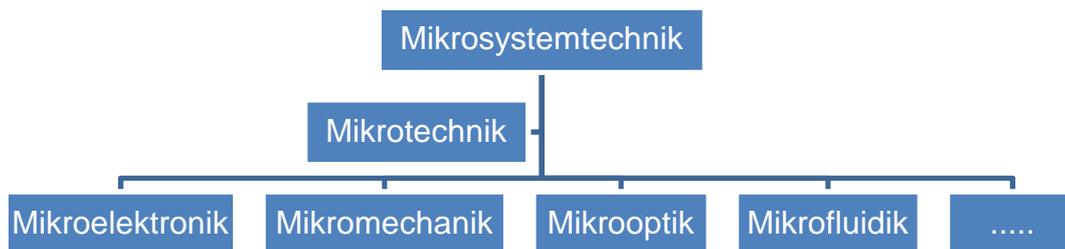


Abbildung 1.1: Anwendungsbereich des Mikrosystemtechniks [OTT04, MES04]

Demgegenüber beschäftigt sich die Mikrotechnik mit Fertigungsverfahren, die zur Herstellung von geometrischen Strukturen mit Dimensionen im Mikrometerbereich von 0,1- 1000 μm angewandt werden [MES04].

Produkte des alltäglichen Lebens, wie USB-Sticks, MP3-Player, Mikroprozessoren, Hörgeräte, etc. weisen Strukturen in dieser Größenordnung auf [LEH08]. Zur Herstellung dieser alltäglichen Gegenstände werden häufig Werkzeugmaschinen aus dem Bereich der Mikrofertigung verwendet, deren Verfahrenswege in Relation zu den miniaturisierten Werkstücken zu groß sind [WUL08]. Laut [WUL08a] herrscht bei den bisherigen Fertigungsanlagen für Mikroteile ein Missverhältnis zwischen Arbeitsraum der Werkzeugmaschine und der Bauteilgröße des Werkstückes. Nach [WUL08a] stellt das Square Foot Manufacturing, welches vom Laboratorium Fertigungstechnik (LaFT) an der Helmut Schmidt Universität als Fabrik –und Fertigungskonzept für die Mikroproduktion entwickelt wurde, eine Lösungsvariante für dieses Missverhältnis dar.

Das LaFT gehört zur Fakultät Maschinenbau an der Helmut Schmidt Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg und ist spezialisiert auf Forschung in den Bereichen der Fertigungsautomation und Mikrofertigung. Der Bereich Mikrofertigung beschäftigt sich mit grundlagenorientierten Projekten zu angewandten

Mikrofertigungsverfahren, sowie zur Entwicklung eines innovativen Maschinenkonzepts für die Mikrofertigung, dem Square Foot Manufacturing. Dieses Konzept sieht vor, dass zur Herstellung von Mikrowerkstücken mehrere Kleinmaschinen, sog. Mikrobearbeitungseinheiten, verwendet werden. Aus diesen wird dabei, prozessorientiert, ein vollständig rekonfigurierbares Produktionssystem aufgebaut [WUL08].

Mit Hilfe der realisierten Mikrobearbeitungseinheit sollen Konturelemente eines Werkstückes im Bereich nur einiger Mikrometer bis zu wenigen Millimetern gefertigt werden [KOH09]. Als Werkzeug kann dabei unter anderem ein Bearbeitungslaser verwendet werden [KOH10]. Die Steuerung der Mikrobearbeitungseinheit und die Lasersteuerung werden zurzeit am Laboratorium durch unabhängige Systeme durchgeführt. Dadurch entsteht eine Asynchronität der beiden Steuerungen. Eine zeitliche Abstimmung ist somit nicht gewährleistet. Daraus resultiert eine Ungenauigkeit, die das gewünschte Ergebnis der Bearbeitung negativ beeinträchtigt.

Die wissenschaftliche Arbeit befasst sich mit der Entwicklung und Implementierung einer einheitlichen Steuerung der Mikrobearbeitungseinheit und eines Bearbeitungslasers auf Basis der Software LabVIEW.

Dazu wird in Kapitel 2 der Stand der Technik und des Wissens betrachtet. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf dem Square Foot Manufacturing Konzept und den Methoden zur Software-Entwicklung.

Mittels der ausgewählten Methode zur Software-Entwicklung wird in Kapitel 3 die Lasersteuerung in der bereits vorhandenen Steuerung der Mikrobearbeitungseinheit entwickelt und implementiert.

Um die gemeinsame Steuerung der Mikrobearbeitungseinheit und des Bearbeitungslasers ausführlich zu testen und deren Zuverlässigkeit und Funktionalität validieren zu können, erfolgt in Kapitel 4 die Durchführung von verschiedenen exemplarischen Bearbeitungsoperationen mittels Square Foot Manufacturing-Komponenten. Dabei werden die erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse der Durchführung vorgestellt.

Als Abschluss werden die Ergebnisse der Arbeit im Kapitel 5 zusammengefasst.

2 Stand des Wissens und der Technik

In diesem Kapitel erfolgt zunächst eine Beschreibung des Square Foot Manufacturing Konzeptes, wobei ein Schwerpunkt auf die Vorschubeinheit gelegt wird. Anschließend werden Methoden zur Software-Entwicklung vorgestellt. Basierend darauf wird ein Vergleich und eine Auswahl der Methodik vorgenommen, die im Kapitel 3 „Entwicklung und Implementierung der Lasersteuerung“ Anwendung findet.

2.1 Square Foot Manufacturing

2.1.1 Ausgangssituation

Mit dem technischen Fortschritt werden Mikro-Produkte immer kleiner, bei gleichzeitig steigender Leistungsfähigkeit [LEH08]. Dadurch steigt die Nachfrage nach Produkten wie z.B. Mobiltelefonen, Hörgeräten oder USB-Sticks, und zeitgleich wird die Forschung und Entwicklung in dem Bereich der Mikrofertigung bzw. –technik intensiviert. Als Folge nimmt die Mikrotechnik in den Industriebereichen der Nachrichten-, Informations-, Elektro-, Fahrzeug- und Medizintechnik an Bedeutung zu [MES04]. Die Größenordnung der Werkstücke in der Mikrotechnik liegt im Bereich von 0,1 – 1000 μm (siehe Abbildung 2.1).

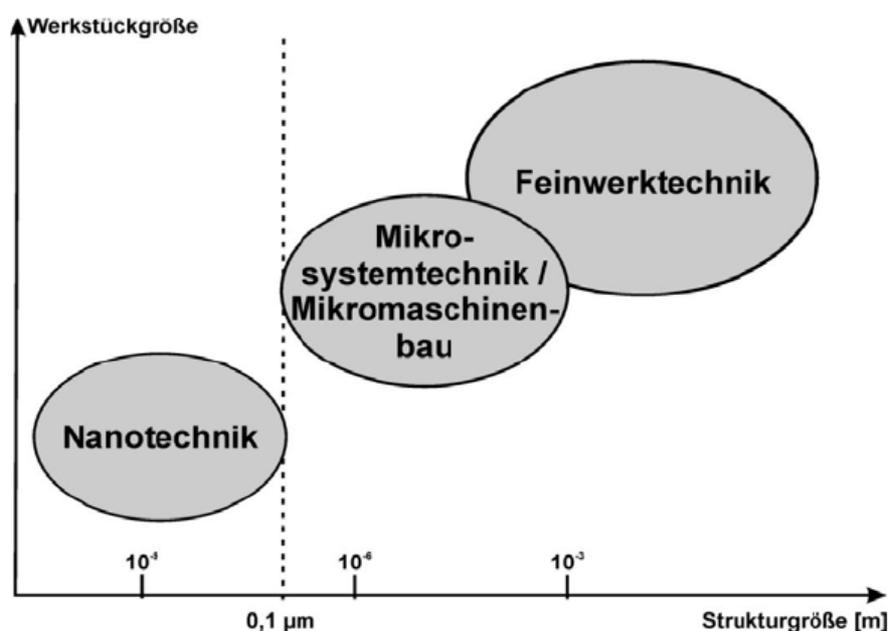


Abbildung 2.1: Werkstückgröße in der Mikrotechnik [LEH08]

Zur Herstellung von geringen Bauteilgrößen unter hoher Qualitätsanforderung sind hochpräzise Fertigungsmaschinen erforderlich.

Nach der Aussage von [WUL08a] werden überwiegend Ultrapräzisionsmaschinen zur Herstellung von miniaturisierten Teilen verwendet, deren Verfahrswege in Relation zur Werkstückgröße im Mikrobereich zu groß sind. Je kleiner hingegen die Verfahrswege einer Werkzeugmaschine (WZM) sind, desto mehr nimmt das Verhältnis zwischen Maschinen- und Werkstückvolumen ab (siehe Abbildung 2.2). Ein großes Verhältnis zwischen Maschinen- und Werkstückvolumen resultiert in einer Summe von negativen Faktoren wie z.B. einem hohem Energieverbrauch oder steigender WZM-Kosten (wie z.B. Instandhaltung oder Betriebsmittel), welche die Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens beeinflussen können [KOH10]. Darüber hinaus begrenzen statische, dynamische und thermische Einflüsse die erreichbare Genauigkeit der Werkstücke (WST).

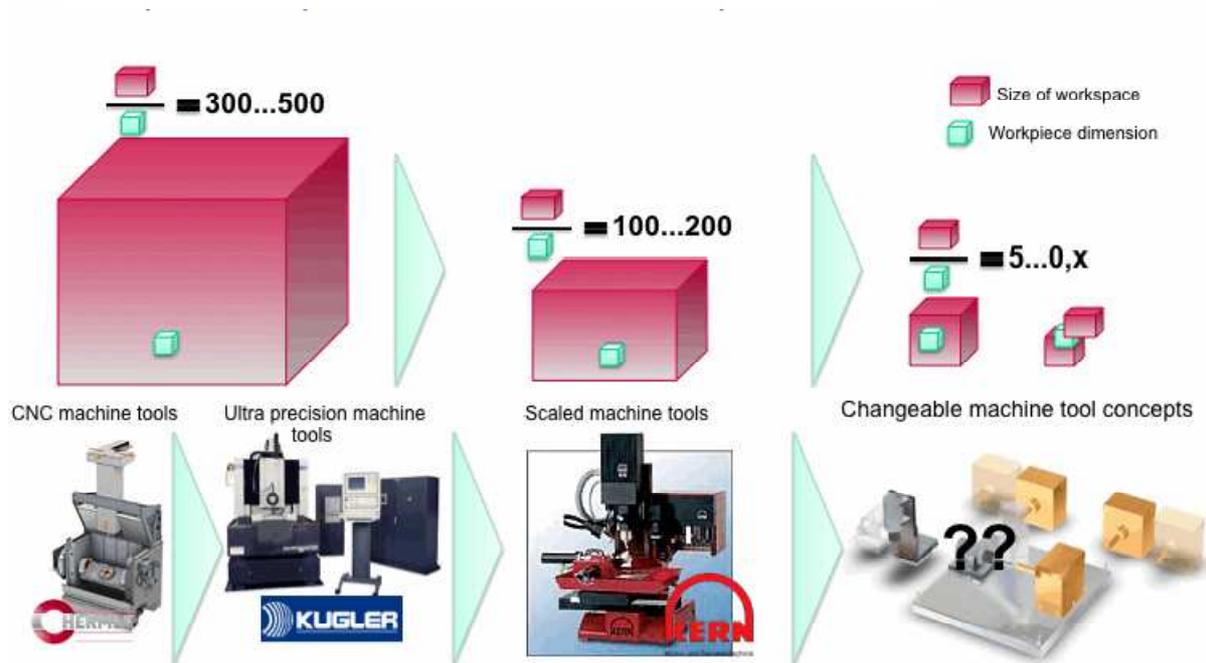


Abbildung 2.2: Maschinen-/Werkstückvolumenverhältnis [WUL09]

Als eine Möglichkeit zur Beseitigung dieses Missverhältnisses wurde am Laboratorium Fertigungstechnik der Helmut Schmidt Universität ein Fabrik- und Fertigungskonzept für Mikroproduktion entwickelt, welches als Square Foot Manufacturing bezeichnet wird.

2.1.2 Konzept

Hinter der Bezeichnung Square Foot Manufacturing verbirgt sich ein wandlungsfähiges Fabrik- und Fertigungskonzept für die Herstellung von Mikroteilen [WUL08b]. Das Konzept basiert auf einer Weiterentwicklung bestehender Desktop Manufacturing Konzepte [LEH08]. Das Desktop Manufacturing definiert eine eigenständige Fertigungsanlage in „Schreibtischgröße“ [LEH08].

Die Namensgebung des Konzeptes ist auf eine Basisplatte mit einer Fläche von einem Quadratfuß (engl. square foot) zurückzuführen, die einer Fläche von ca. 300x300 Millimeter entspricht (siehe Abbildung 2.3) [LEH08].

Durch die Verwendung von Mikrobearbeitungseinheiten (MBE) und Werkstückcarriern auf einer Basisplatte (siehe Abbildung 2.3) können so bedarfsorientiert komplexe Fertigungseinrichtungen, sogenannte Square Foot Factory (SFF), geschaffen werden [WUL08a].

Zur Fertigung von Mikroteilen auf einer Fertigungsanlage, der sog. SFF, werden spezialisierte Kleinst-WZM eingesetzt. Im Kontext werden diese als Mikrobearbeitungseinheit bezeichnet. Diese ist wiederum modular aufgebaut und besteht aus den Komponenten Vorschubeinheit (VE) und Werkzeugmodul. Die Entwicklung und Realisierung einer VE wird in [KOH09; KOH10] vorgestellt.

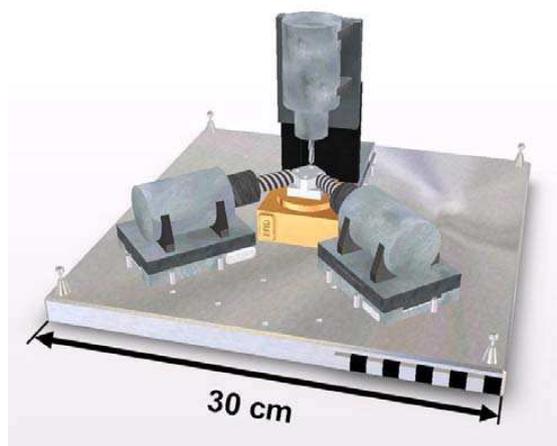


Abbildung 2.3: Square Foot Manufacturing [WUL08b]

Die Halterung eines Werkstücks während der Bearbeitungs- und Transportzyklen wird von einem Carrier, auch als Werkstückträger bezeichnet, unterstützt [LEH08].

Als Schnittstelle zwischen der MBE/Carrier und der Grundplatte dient ein selbstjustierendes koordinatentreues Spannsystem [LEH08]. Dieses System gewährleistet eine definierte Positionierung der Module auf der Grundplatte. Mit dem Ansatz des Desktop Manufacturing in Kombination mit dem selbstjustierenden koordinatentreuen Spannsystem können miniaturisierte Werkzeugmaschinen ortsflexibel auf einer Basisplatte angeordnet werden. Demzufolge entsteht zwischen Werkstück und MBE eine feste oder starre Kopplung [WUL08b].

Die Bearbeitungsprozesse der MBE können zeitlich parallel, oder sequenziell durchgeführt werden, wobei eine Überlappung der einzelnen Arbeitsräume erreicht wird [WUL08a]. Dadurch werden kombinierte multifunktionale Arbeitsräume erschaffen, was zur Verkürzung der Durchlaufzeit führt [LEH08]. Dieses Prinzip wird in Abbildung 2.4 als Baustellenfertigung mit den dazugehörigen Carrier- und der Maschinenbereitstellung dargestellt.

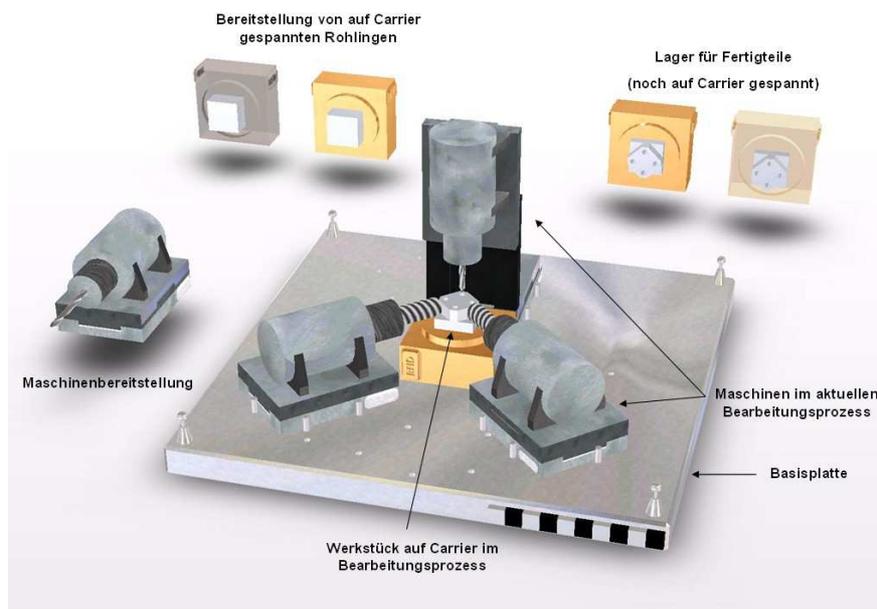


Abbildung 2.4: Baustellenfertigung [WUL08b]

Bezüglich der Ablauforganisation können neben der Baustellenfertigung auch Anlagen nach der Werkstattfertigung realisiert werden [WUL08a]. Dazu werden mehrere Basisplatten benötigt, worauf jeweils eine MBE ortsfest gebunden ist. In der Abbildung 2.5 ist zu erkennen, dass die Werkstückcarrier in einer Werkstattfertigung von Basisplatte zu Basisplatte unterschiedlich zur MBE positioniert sind bzw. einen problemlosen Werkstückwechsel ermöglichen [WUL08a].

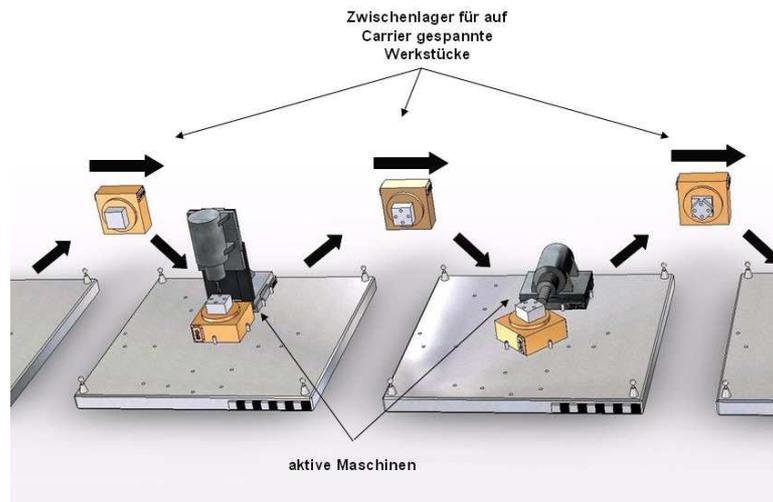


Abbildung 2.5: Werkstattfertigung [WUL08a]

2.1.3 Vorschubeinheit

Wie bereits in Kapitel 2.1.2 vorgestellt, besteht eine Mikrobearbeitungseinheit aus den zwei Komponenten, Vorschubeinheit (VE) und Werkzeugmodul. Um den Aufbau und die Funktionalität einer Vorschubeinheit zu erläutern, werden in diesem Unterkapitel deren Komponenten (siehe Abbildung 2.6) beschrieben.

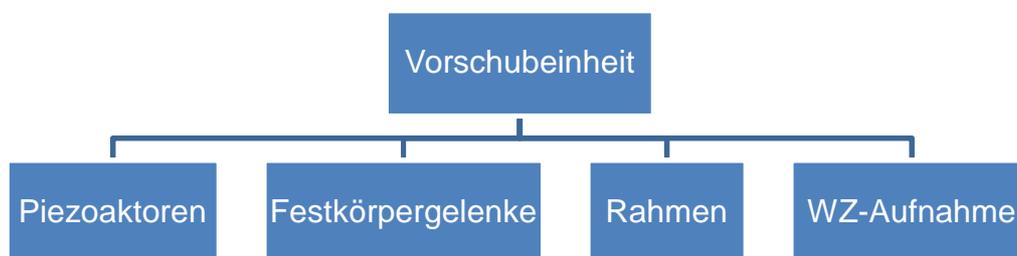


Abbildung 2.6: Komponenten einer Vorschubeinheit

Als eine VE-Komponente wird zunächst der Antrieb betrachtet. Als Antrieb der Vorschubeinheit werden zwei Piezoaktoren zur Initiierung der Bewegung verwendet [KOH09].

Das grundlegende Prinzip des Piezoaktors beruht auf dem piezoelektrischen Effekt, auch als Piezoelektrizität bezeichnet. Darunter versteht man die Wechselwirkung zwischen Elektrik und Mechanik, die bei bestimmten Materialien auftreten [WAN06].

Es existieren zwei Arten des Effekts, der direkte und der inverse piezoelektrische Effekt. Als direkter piezoelektrischer Effekt wird das Auftreten elektrischer Ladung an

der Oberfläche eines piezoelektrischen Körpers bei Einwirkung einer mechanischen Kraft definiert. Wird am selben Körper eine elektrische Spannung angelegt, ändert sich seine geometrische Abmessung, dies wird als inverser piezoelektrischer Effekt bezeichnet [WAN06]. Der inverse piezoelektrische Effekt wird in Piezoaktoren genutzt. Solche finden sich auch in der Vorschubeinheit des SFMs wieder [NAU09].

Ein Piezoaktor besteht aus einer Vielzahl von dünnen Schichten aus Piezokeramik mit zwischenliegenden Elektroden [WAN06]. Die Dicke sowie die Längenänderung jeder einzelnen Schicht ist sehr gering. Die Längenänderung wird durch das Anlegen eines elektrischen Feldes erreicht. Nutzbar wird dieser Effekt wenn alle Schichten gleichzeitig unter elektrische Spannung gelegt werden (siehe Abbildung 2.7) [WAN06].

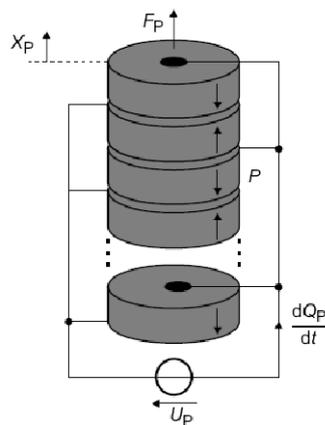


Abbildung 2.7: Prinzipielle Darstellung eines Piezoaktors [WAN06]

Neben der Auslenkung ist auch die durch die Piezoaktoren aufbringbare Kraft ein Grund für ihren Einsatz in der Vorschubeinheit [NAU09]. Für den verwendeten Wegvergrößerungsmechanismus werden sog. Festkörpergelenke eingesetzt.

Ein Festkörpergelenk besteht aus zwei benachbarten Starrkörpern, die laut [JUN04] durch einen Bereich mit verminderter Biegesteifigkeit getrennt sind (siehe Abbildung 2.8). Durch eine spielfreie, reibungsfreie und verschleißfreie, sofern keine Ermüdungsbrüche auftreten, Bewegung besitzen Festkörpergelenke positive Eigenschaften [JUN04].

Festkörpergelenke besitzen durch ihre kreisförmige Einkerbung (siehe Abbildung 2.8) ein ortsfestes Drehzentrum. Infolgedessen können bei einer Verformung Spannungsspitzen auftreten, welches sich nachteilig auf die Haltbarkeit auswirken

[JUN04]. Des Weiteren sind Festkörpergelenke nur für kleine Bewegungsamplituden geeignet [HAR05]. In Abbildung 2.8 wird die geometrische Grundform eines Festkörpergelenks an der Vorschubeinheit präsentiert.

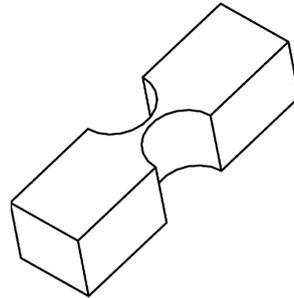


Abbildung 2.8: Festkörpergelenk mit kreisförmiger Einkerbung [KÄM09]

Für die Festkörpergelenke, sowie für Rahmen und WZ-Aufnahme wird eine hochfeste Aluminiumlegierung mit der Werkstoffbezeichnung EN AW-2024 T3; EN AW-Al Cu4Mg1 verwendet [BAY10; KOH10]. Durch die hohe elastische Dehnung und die hohe Streckgrenze des Werkstoffes ist an den Festkörpergelenken eine hohe Nachgiebigkeit zu erwarten [KOH10].

Die Vorschubeinheit hat eine Länge von 162 mm, eine Breite von 216 mm und eine Höhe von 46 mm [KOH10] (siehe Abbildung 2.9). Die Grundfläche einer SFF wird mit den Abmessungen der Vorschubeinheit nicht überschritten.

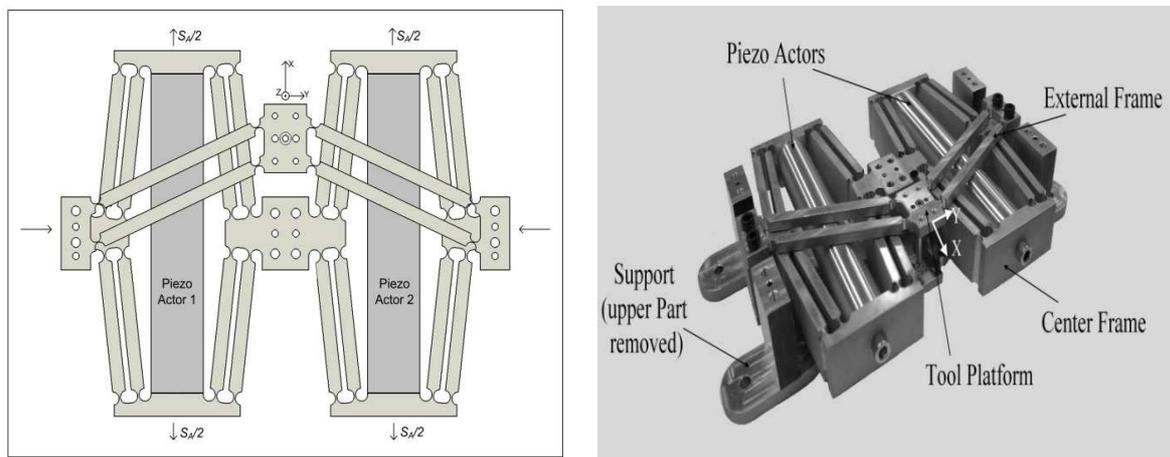


Abbildung 2.9: Vorschubeinheit: schematisch (links), aktuell (rechts) [KOH10]

Der Bearbeitungsraum besitzt eine maximale Auslenkung von 1,9 mm in X-Richtung und $\pm 0,42$ in Y-Richtung [KOH10] und besitzt die Form einer Raute (siehe Abbildung 2.10).

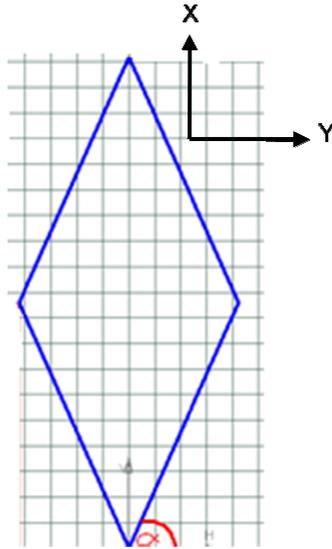


Abbildung 2.10: Darstellung des Arbeitsraums [FRE09]

Durch die Parallelschaltung der Piezoaktoren und die Kinematik des Vorschubrahmens entsteht der rautenförmige Arbeitsraum. Wird nur einer der beiden Piezoaktor mit einer Spannung beaufschlagt, verfährt die WZ-Aufnahme entlang einer Diagonalen. Aufgrund der Symmetrie des Vorschubrahmens resultiert gleichzeitig ein symmetrischer Arbeitsraum (siehe Abbildung 2.9).

Zur Bearbeitung des WSTs kann auf der WZ-Aufnahme (engl. tool platform) jeweils eine Mikrospindel oder eine Laseroptik aufgesetzt werden [KOH10].

Die außergewöhnliche Mobilität der Vorschubeinheit resultiert vor allem aus den kompakten Abmessungen und der einfacher Handhabbarkeit. Die komplette Einheit ist transportabel und kann ortsflexibel eingesetzt werden [WUL08a].

2.2 Methoden der Software-Technik

Zur Bewältigung der hohen Anforderung oder Komplexität großer Software-Systeme hat die Software-Technik eine Vielzahl von Konzepten und Methoden entwickelt, um den Entwicklungsprozess von Software zu beschleunigen und besser zu strukturieren. Alle Konzepte und Methoden der Systemanalyse stützen sich auf eine graphische Darstellung, die in der Regel ein Hilfsmittel zur Übersetzung von Software-Modellen in eine textbasierte Programmiersprache darstellt [MÜT09].

Im Idealfall kann eine Software die graphische Darstellung direkt in ein ausführbares Programm überführen. In dem Fall entfällt für den Programmierer die Erstellung des Quelltexts [MÜT09].

Bedingt durch die enorme Steigerung der Rechnerleistung gewinnen visuelle bzw. graphische Programmiersprachen als Alternative zu textbasierten Programmiersprachen zunehmend an Bedeutung [MÜT09].

Im Rahmen dieses Kapitels werden die Darstellungsmethoden Datenflussdiagramm, Programmablaufplan und Struktogramm erläutert. Alle drei Darstellungstypen beruhen auf der Top-Down-Technik [SCH90; RAA92; BOH77]. Die Besonderheit dieser Technik ist die Vorgehensweise, von der Gesamtheit zu den Einzelheiten eines Systems, schrittweise zu programmieren [STO93].

Des Weiteren wird aufgezeigt, welche Darstellungsart der Software LabVIEW zu Grunde liegt und wie die Methoden in LabVIEW direkt für einen systematischen Software-Entwurf genutzt werden können.

2.2.1 Strukturierte Analyse - Datenflussdiagramm

Definition

Das Datenflussdiagramm (DFD) nach DeMarco wurde im Jahre 1979 von Tom DeMarco entwickelt. Es ist eine der drei wesentlichen Komponenten der strukturierten Analyse (SA) [MÜT09]. Die weiteren zwei Komponenten sind die Mini-Spezifikation und das Datenverzeichnis, die aber im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter behandelt werden. Die Datenflussdiagramme bestehen aus graphischen Symbolen, die den Fluss der Daten durch ein System beschreiben.

Nach [DIN 66001] gibt es insgesamt 24 Sinnbilder für die Darstellung eines Prozesses, aber zur Beschreibung eines Datenflussdiagramms nach DeMarco werden nur die vier in Abbildung 2.11 dargestellten Symbole verwendet.

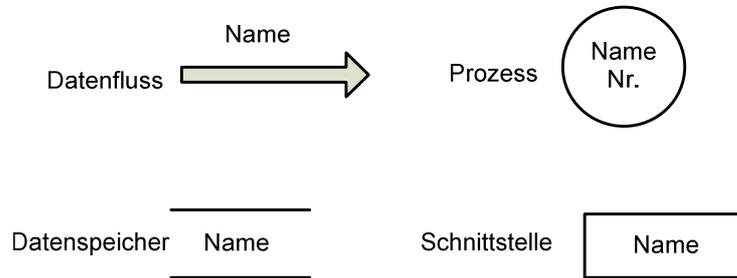


Abbildung 2.11: grafische Symbole in Datenflussdiagrammen [RAA92]

Prozesse: Sie haben die Aufgabe Eingabedaten in einen Algorithmus zu konvertieren und sie in Ausgabedaten zu übergeben [RAA92].

Datenspeicher: Stellen einen temporären Aufenthaltsort für Daten dar. Es kann jede Art von Speicher sein z.B. Lager, Kartei.

Schnittstelle: Treten im Datenflussdiagramm nur als Sender und Empfänger von Daten bzw. als Datenquelle und Datensenke auf.

Datenfluss: Zeigen die Richtung des Informationsflusses.

Die Gesamtheit des Prozesses wird im DFD in Teilprozessen auf mehreren Ebenen verfeinert (siehe Abbildung 2.12) [RAA92]. Die oberste Ebene der Verfeinerungshierarchie wird als Kontextdiagramm bezeichnet. Basierend auf der Top-Down-Technik kann der Detaillierungsgrad zur Visualisierung der Teilprozesse beliebig gewählt werden. Die Verfeinerung endet, wenn auf der untersten Ebene nur Prozesse erscheinen, deren Funktionen, für die weitere Zerlegung keinen Sinn mehr ergeben [SCH90].

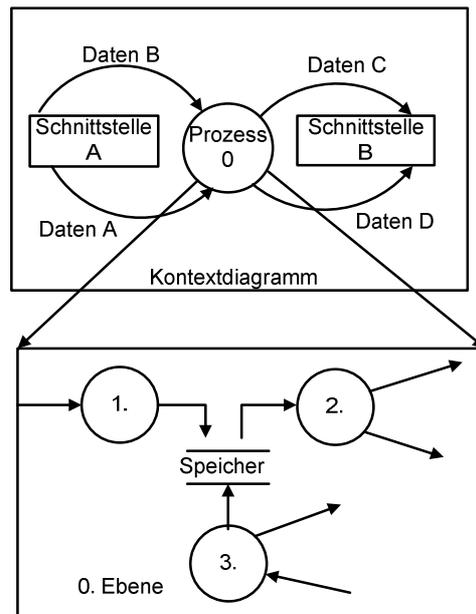


Abbildung 2.12: Modellhierarchie des Datenflussdiagramms [STO93; RAA92]

Im nächsten Abschnitt wird ein Beispiel zu der Software-Technik Datenflussdiagramm nach DeMarco veranschaulicht.

Beispiel

Das dargestellte Kontextdiagramm in Abbildung 2.13 zeigt die Person bzw. Organisation „Kunde“ und das System „Vertrieb“, die beide sowohl Datenquelle als auch –senke sind. Eine Datenquelle repräsentiert eine Person, Organisation oder allgemein eine System, das Daten an das im Datenflussdiagramm beschriebene System sendet [SCH90]. Entsprechend ist eine Datensenke außerhalb des Systems ein Datenempfänger [SCH90].

Als Kernprozess wird „Erfassen Aufträge“ im Datenflussdiagramm repräsentiert. In der nächsten Ebene, wird der Prozess „Erfassen Aufträge“ noch weiter verfeinert, um mehr über die Auftragserfassung zu erfahren. Somit wird der Prozess nun schrittweise top-down in Subsysteme zerlegt.

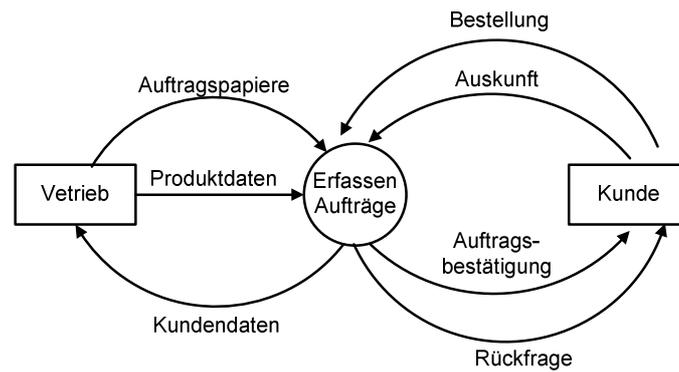


Abbildung 2.13: Kontextdiagramm [SCH90]

Abbildung 2.14 zeigt den Prozess für die Auftragserfassung auf der 0-Ebene. Der Prozess „Erfassen Aufträge“ wird hier in drei Teilprozesse zerlegt, diese tragen die Nummern 1 bis 3 und sind sequenziell aufgebaut. Die Teilprozesse werden per Datenfluss miteinander verknüpft. Diese Datenfluss Verknüpfungen stehen zudem in ständiger Verbindung zur Außenwelt.

Zwischen den Teilprozessen „Bestellungen erfassen“ und „Auftragspapiere erstellen“ befindet sich ein Zwischenspeicher „Auftragsbestand“.

Desweiteren können Teilprozesse wieder in einer der nächsten Ebenen verfeinert werden.

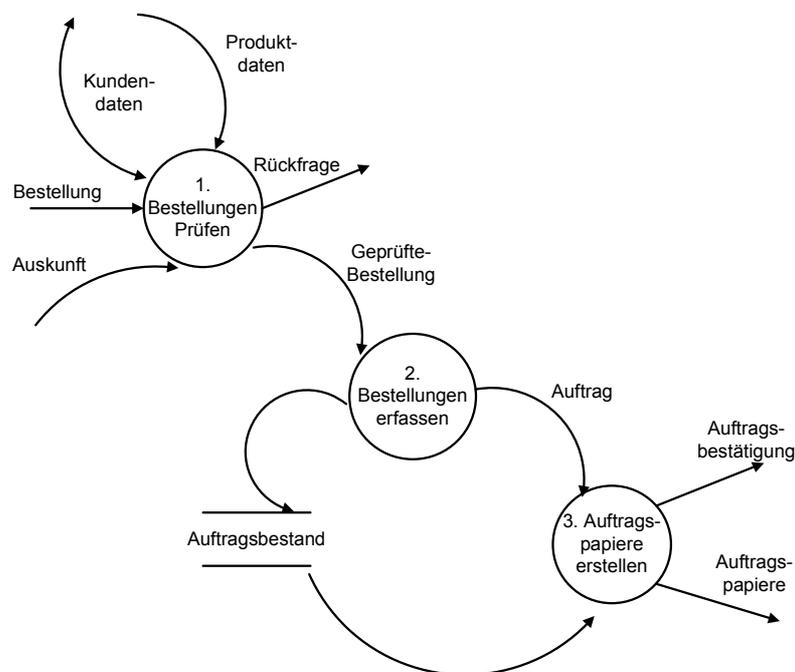


Abbildung 2.14: 0. Ebene "Erfassen Aufträge" [SCH90]

Strukturierte Analyse mit LabVIEW

Das Datenflussdiagramm wird in LabVIEW ebenso als graphisches Modell abgebildet. Die zwei Schnittstellen der Software LabVIEW sind zum einen das Frontpanel (siehe Abbildung 2.15) und zum anderen das Blockdiagramm (siehe Abbildung 2.16). Die Ein- und Ausgabe von Parametern wird in der Bedienoberfläche, dem sog. Frontpanel, getätigt. Im Blockdiagramm werden Ein- und Ausgabeelemente sowie Funktionen oder Unterprogramme über Datenflusskanäle, wie in Abbildung 2.16, miteinander verbunden [GEO07].

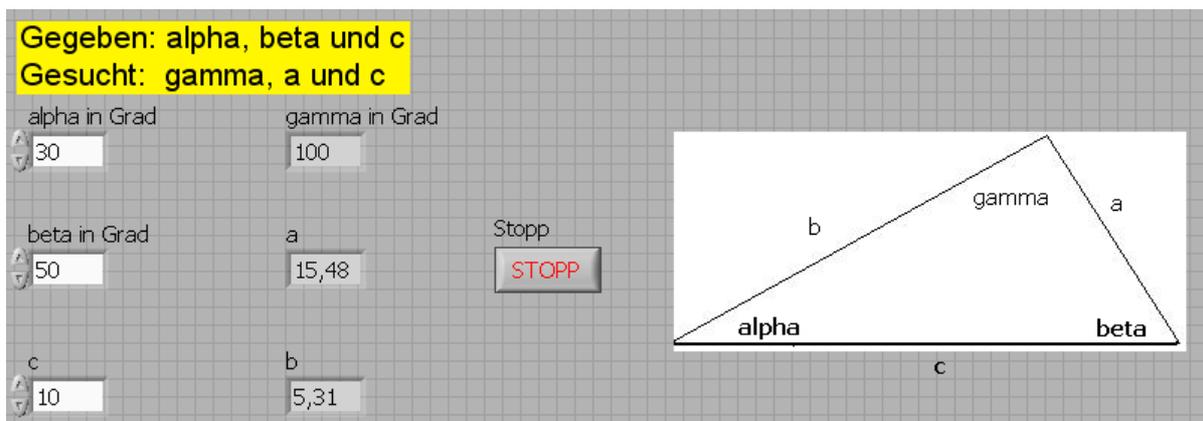


Abbildung 2.15: Virtuelle Bedienoberfläche zur Dreiecksberechnung [GEO07]

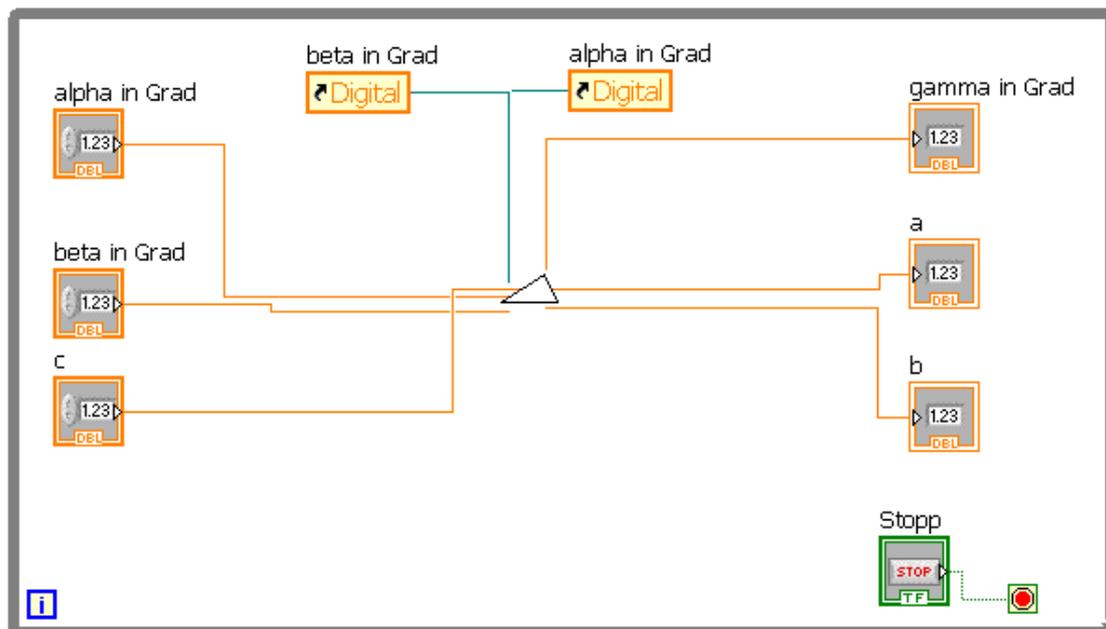


Abbildung 2.16: Kontextdiagramm in LabVIEW [GEO07]

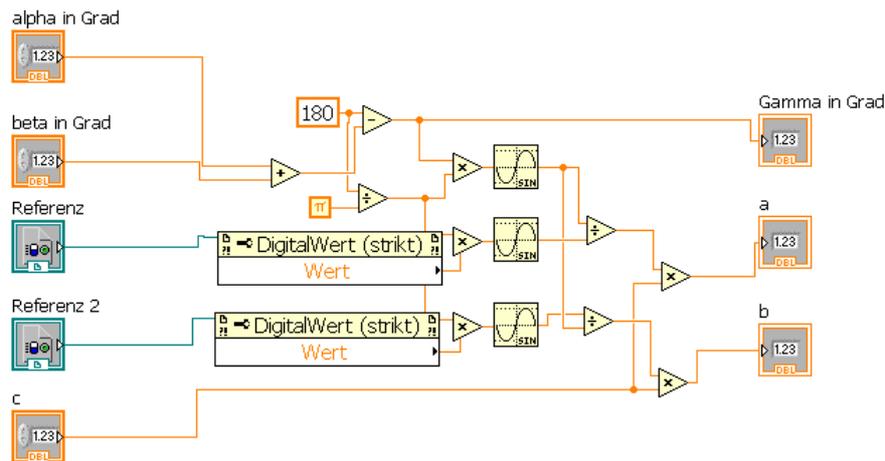


Abbildung 2.17: Teilprozess " Seiten- und Winkelberechnung" [GEO07]

Die Funktionen von LabVIEW bzgl. des Hierarchiemodells der DFD-Methode wird an dem Beispiel „Dreiecksberechnung“ vorgestellt.

Zur Bestimmung eines Dreiecks werden die Winkel Alpha und Beta und die Hypotenuse im Frontpanel (siehe Abbildung 2.15) vom Bediener eingegeben. Das Programm berechnet den Winkel Gamma, die Gegenkathete und die Ankathete. Im Kontextdiagramm fließen die Eingabeparameter in Datenkanäle zum nächsten Unterprogramm, einem sog. SubVI (siehe Abbildung 2.16). Das Unterprogramm „Seiten- und Winkelberechnung“ (siehe Abbildung 2.17) berechnet die gesuchten Parameter. Der Bediener kann sich im Frontpanel die errechneten Parameter anzeigen lassen. Die Realisierung von Datenspeichern durch Konstanten, Datenfelder, Dateien oder Unterprogrammen können in LabVIEW vorgenommen werden, somit entspricht das Blockdiagramm in LabVIEW direkt dem DFD der SA [MÜT09].

Vor-und Nachteile

Datenflussdiagramme enthalten kaum Informationen über die einzelnen Datenstrukturen, zeigen aber die Existenz von Speichern und die für die Nutzung dieser Speicher erforderlichen Funktionen [RAA92]. Der wesentliche Vorteil dieser Methode ist die Visualisierung von Prozessen bzw. Software-Prozessen. Jedoch lassen sich die Dateien als eine Menge von Datenelementen beschreiben. Beziehungen zwischen den Datenelementen lassen sich nicht abbilden [SCH90]. Die Darstellungsmethode nach DeMarco eignet sich nicht für Aufgaben, in denen die

Eingabedaten ausschließlich nichtsequentiell verarbeitet werden, d.h. Teile des Programms können nicht unabhängig voneinander ausgeführt werden [PLA85].

2.2.2 Ablaufstruktur

Der Ablaufplan dient zur graphischen Darstellung eines Algorithmuses bzw. der einzelnen Schritte eines Programmes [COM10]. Ein Algorithmus ist eine Berechnungsregel, die aus mehreren elementaren Schritten besteht, die in einer bestimmten Reihenfolge ausgeführt werden müssen [WEL98]. Zur Erläuterung der grafischen Darstellungsmethoden werden im Rahmen dieser Arbeit der Programmablaufplan (PAP) und das Struktogramm (STG) näher beschrieben.

Bei beiden Darstellungsmethoden werden aus einer großen Anzahl an Algorithmenregeln stets dieselben CASE-Tools (Computer Aided Software Engineering) angewendet:

- Sequenz: die Verarbeitung von Schritten nacheinander
- Verarbeitung / Folge: die Beschreibung einer einzelnen Anweisung
- Verzweigung: die Auswahl von bestimmten Schritten
- Schleife: die Wiederholung von Schritten [WEL98]

Je nach Ablaufplan und Steuerungsproblem können diese vier CASE-Tools, auch als Kontrollstrukturen bezeichnet, nach Festlegung des Algorithmus eingesetzt werden.

Programmablaufplan

Definition

Ein Programmablaufplan (PAP), auch als Flussdiagramm oder Programmablaufstruktur bezeichnet, ist eine grafische Darstellung zur Umsetzung eines Algorithmus [GAB10a]. Der Prozess wird symbolisch durch Sinnbilder und der Steuerungsablauf durch Ablauflinien dargestellt. Die schematische Darstellung der Symbole und Programmkonstrukte werden aus [DIN 66001] und [DIN 66262] entnommen. Damit kann jeder Programmablauf in einheitlicher Weise aus wenigen Bausteinen gebildet werden [ARZ90].

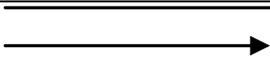
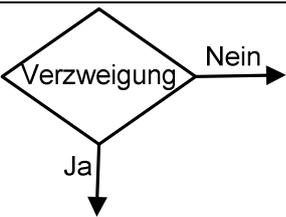
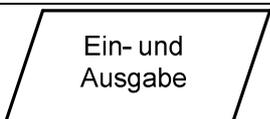
Ein Programmkonstrukt ist eine abgeschlossene Einheit, die keine Abhängigkeit mit anderen Programmkonstrukten zulässt. Jedes Programmkonstrukt besitzt einen

Eingang und Ausgang. Es besteht aus einem Steuerungsteil und einem oder mehreren Verarbeitungsteilen [WEL98].

Der Steuerungsteil besitzt die Aufgabe, die Ausführung von Sequenzen und die Anzahl der Wiederholungen für Verarbeitungsteile festzulegen. Analog zum Datenflussdiagramm kann auch das PAP auf mehreren Ebenen verfeinert werden, indem ein Verarbeitungsteil wieder durch ein Programmkonstrukt ersetzt wird. Somit werden Schachtelungen von Programmkonstrukten gebildet [BOH77].

Nach [DIN 66001] existieren insgesamt 11 Sinnbilder für die Illustration eines Flussdiagramms, wobei sechs von diesen in Tabelle 2.1 als wesentliche Elemente vorgestellt werden:

Tabelle 2.1: Sinnbilder für Programmablaufpläne nach [DIN 66001]

	Start-, Grenz- oder Endpunkt des PAPs
	Verbindung zum nächstfolgenden Element
	Ausführung einer Tätigkeit
	Es können mehrere Ein- und Ausgänge vorhanden sein
	Auswahl von bestimmten Schritten
	Ein- und Ausgabe von Parametern.

Für eine bessere Übersicht und ein leichteres Verständnis von Programmablaufplänen wird im nächsten Unterkapitel ein Beispiel gegeben.

Beispiel

Das Beispiel „Rabattberechnung“ in der Abbildung 2.18 zeigt den Algorithmus eines Programmablaufs beim Bestellen eines Produktes und dessen Rabattkonditionen. Nach dem Eingang „Lieferschein gelesen“ wird die Operation „Zwischensumme“, als Produkt aus Menge und Preis, ermittelt. Beim nächsten Schritt folgt eine Fallunterscheidung, ob die Bestellmenge größer als 99 ist. Tritt dieser Fall auf, folgt darauf nochmals eine Fallunterscheidung, ob die Bestellmenge größer ist als 499. Wird eine von beiden Fallunterscheidungen verneint, tritt die Operation „Rechnungsbetrag“ mit der jeweiligen Rabattkondition in Kraft. Nach der Operation „Drucke Rechnung“ folgt eine Abfrage, ob der Bearbeitungszyklus nochmals wiederholt werden soll. Die Verneinung beendet das Programm.

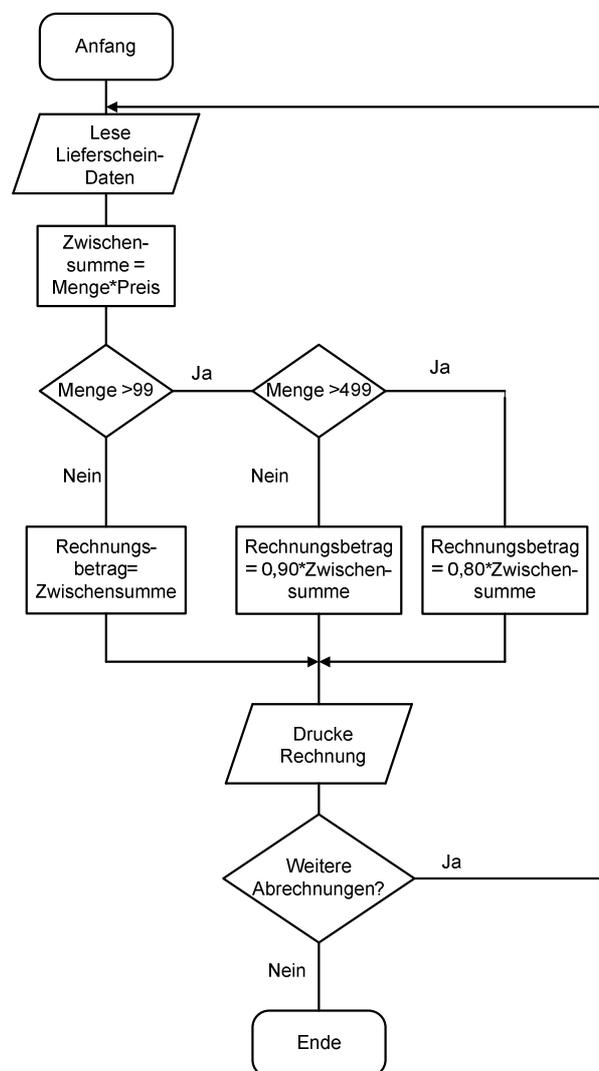


Abbildung 2.18: "Rabattberechnung" [BOH77]

Vor- und Nachteile

Im Vergleich zur DFD bieten Programmablaufpläne die Möglichkeit, verschiedene Abstraktionsebenen (Stichwort: Unterprogramme) anzuzeigen. Ein weiterer Vorteil ist die anschauliche Illustration von Kontrollstrukturen und Verzweigungen, die für Algorithmen geeignet sind. Beim Aufrufen von unterschiedlichen Elementen weist das PAP auf kein Informations- bzw. Datenfluss hin, dabei wird ausschließlich auf einen Kontrollfluss Bezug genommen. Desweiteren behindert die Programmablaufplan-Technik die strukturierte Programmierung, da Verzweigungen und Zusammenführungen beliebig miteinander kombiniert werden können [GAB10a].

Struktogramm

Definition

Das Struktogramm (STG) wurde im Jahre 1972/73 von Isaac Nassi und Ben Shneidermann, bekannt auch als Nassi-Shneidermann-Diagramm, entwickelt. Es dient der grafischen Darstellung von Programmabläufen und -entwürfen eines Algorithmus und ist nach [DIN 66261] genormt. Die Philosophie der STG-Technik basiert auf der strukturieren Programmierung [SCH90]. Das Nassi-Shneidermann-Diagramm wird aus Strukturblöcken, die als Sinnbilder des Struktogramms fungieren, zusammengesetzt. Strukturblöcke sind entweder hintereinander oder ineinander geschachtelt [GAB10]. Struktogramme werden stets bei Entwurfsphasen der Software-Entwicklung genutzt (siehe Abbildung 2.19), um frühzeitige Fehler bei der Implementierung von Programmen zu vermeiden. [MÜT09, GAB10].

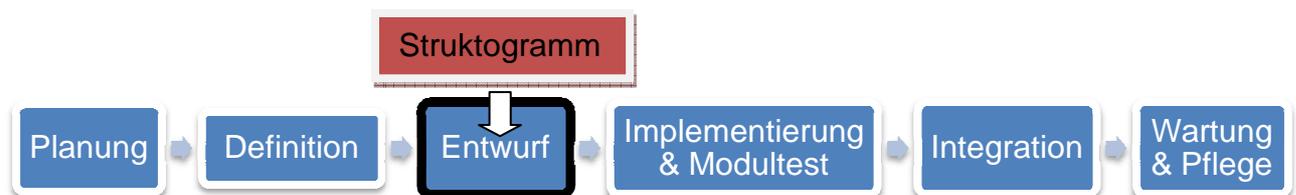


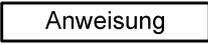
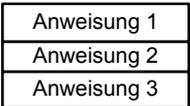
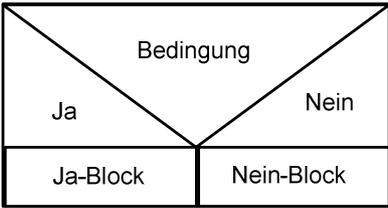
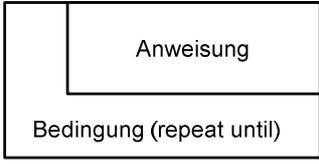
Abbildung 2.19: Typische Phasen der Software-Entwicklung [MÜT09]

Struktogramme werden in Rechtecken dargestellt, die jeweils einen Eingang (obere Kante) und einen Ausgang (untere Kante) besitzen. Da Struktogramme stets von oben nach unten gelesen werden, sind Ablaufflinien überflüssig [WEL98].

Äquivalent zu den Darstellungen DFD und PAP kann auch ein gesamtes Struktogramm wiederum in weitere Strukturblöcke unterteilt werden, so dass ein hierarchischer Aufbau entsteht, der laut [WEL98] zur Überschaubarkeit der Programmlogik beiträgt.

In der folgenden Tabelle 2.2 werden die wichtigsten Symbole der Struktogramm-Technik aus der [DIN 66261] vorgestellt. Zur Orientierung sollen hierzu, wie bereits im Kapitel 2.2.2 „Ablaufplan“ diskutiert, die Kontrollstrukturen aufgegriffen werden.

Tabelle 2.2: Sinnbilder nach Nassi und Shneidermann nach [DIN 66261]

	<p>elementarer Strukturblock</p>
	<p>Sequenz von mehreren Strukturblöcken</p>
	<p>Verzweigung von bestimmten Schritten</p>
	<p>Abweisende Wiederholungsanweisung</p>
	<p>Nichtabweisende Wiederholungsanweisung</p>

Die Anwendung der STG-Technik erfolgt im folgenden Unterkapitel.

Beispiel

In diesem Abschnitt wird ein mathematischer Programmablauf „Lösung eines linearen Gleichungssystems“ mit Hilfe des STGs demonstriert. Die Berechnung des linearen Gleichungssystems wird explizit nicht erläutert, sondern nur die Funktionalität des STGs.

Um eine hierarchische Gliederung nach der Top-Down-Technik zu konstruieren, beginnen Struktogramme stets mit einer Startzeile (siehe Abbildung 2.20). Dieses Struktogramm besteht aus fünf Strukturblöcken, die wiederum jeweils ein Unterprogramm enthält. Nach dem Unterprogramm „Berechne Dreiecksform“ folgt das nächste Unterprogramm „Berechne Lösungsvektor“, was in Abbildung 2.21 auf einer separaten Ebene verfeinert wird.

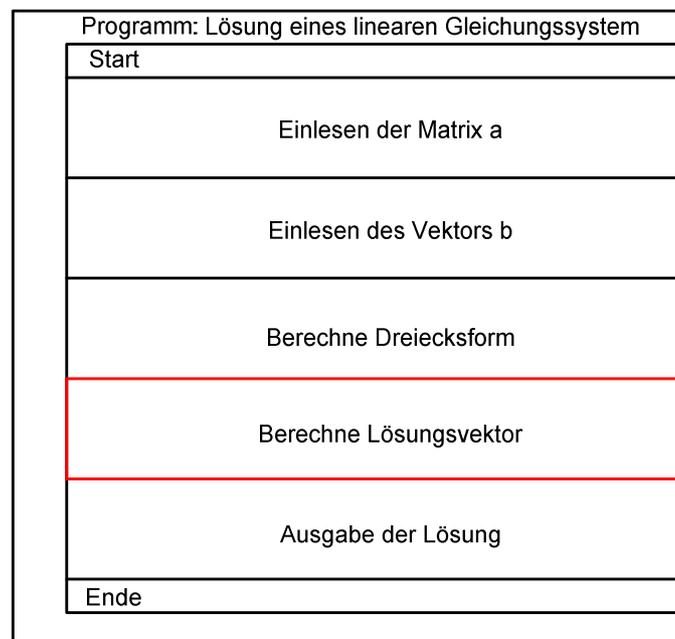


Abbildung 2.20: Hauptprogramm [STO93]

Die Anweisung „Berechne Lösungsvektor“ befindet sich in einer nichtabweisenden Wiederholungsanweisung, d.h. die Prüfung findet nach dem Durchlauf der Anweisung statt [STO93]. In der letzten Hierarchiestufe tritt eine Verzweigung auf, nach dem die Randbedingung in Abbildung 2.21 abgeschlossen wurde. Nach der Berechnung des linearen Gleichungssystems veröffentlicht das Programm die Lösung.

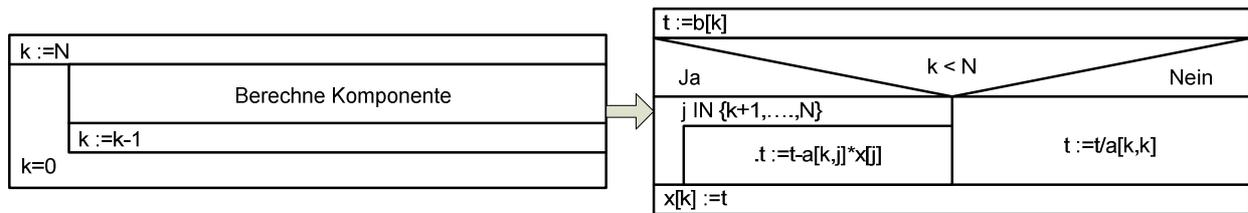


Abbildung 2.21: Unterprogramme [STO93]

Vor- und Nachteile

Die Programmstrukturierung mit Hilfe des Nassi-Shneidermann-Diagramms hat u.a. folgende Vorteile:

- Die Darstellungstechnik nach Nassi-Shneidermann zwingt den Benutzer zu disziplinierter Gestaltung des Programmablaufs [GAB10]. Die Darstellungsart lässt ein Aneinander-, Nebeneinander- oder Ineinanderstellen aber kein Überlappen der Bausteine zu [PLA85]. Im Gegensatz zur PAP-Darstellung werden Sprünge bzw. Rücksprünge im STG nicht gewährleistet [WEL98].
- Der Einsatz von Struktogrammen entspricht der Top-Down-Vorgehensweise bei der Programmerstellung [PLA85]. Die Diagramme können sowohl als Entwurfs- sowie als Dokumentationsmittel verwendet werden [ARZ90].
- Desweiteren können anhand des STGs frühzeitige Fehler von Software-Tools bei einer Implementierung vermieden werden [GAB10].

Als Nachteile der Anwendung können genannt werden:

- Bei komplexeren Algorithmen können Struktogramme sehr groß und unübersichtlich werden. Auf diesem Grund verzichten viele Programmierer auf die Nutzung von STGs [GAB10].
- Für die Benutzung ist eine Einarbeitungszeit notwendig, in der Erfahrung mit dieser Art der Programmstrukturierung gesammelt werden muss [PLA85].
- Die Regel, dass ein Block nur einen Ausgang besitzen darf, kann zu einem vermehrten Setzen von Strukturblöcken führen, was wiederum andere Stellen im Programm beeinflussen kann [PLA85].

Ablaufstruktur in LabVIEW

Nach der Darstellung eines Algorithmuses im Programmablaufplan oder dem Entwurf in einem Struktogramm kann dieser in einer beliebigen Programmiersprache realisiert werden [MÜT09]. Dazu wird ein zusätzlicher Arbeitsschritt zur Übersetzung nötig, wodurch sich die Entwicklungszeit zusätzlich verlängert [MÜT09].

Deshalb wird in diesem Abschnitt die Schnittstelle zwischen den Kontrollstrukturen des Ablaufplans und der Software LabVIEW mit Hilfe des Beispiels „Erzeugen einer Sinuskurve“ visualisiert, um die Funktionalität der Software LabVIEW in Bezug auf die graphische Darstellung der Programmiersprache darzustellen. Wenn erfolgreich, kann der Übersetzungsschritt vollständig entfallen.

In Abbildung 2.22 wird das Beispielprogramm in Form von zwei Blockdiagrammen in LabVIEW dargestellt. Nachdem der Bediener die Anzahl der Iterationsschritte im Frontpanel festgelegt und das Programm gestartet hat, wird der Sinusverlauf bei einem FALSE-Fall im Anzeigebild angezeigt (siehe Abbildung 2.22 (links)).

Die While-Schleife ist solange aktiv, bis der Bediener die boolesche Operation „Stopp“ im Frontpanel betätigt hat. Das Programm endet, indem die While-Schleife unterbrochen wird. Durch die Stopp-Funktion wird der TRUE-Fall ausgelöst und die Sinuskurve wird im Frontpanel gelöscht (siehe Abbildung 2.22 (rechts)).

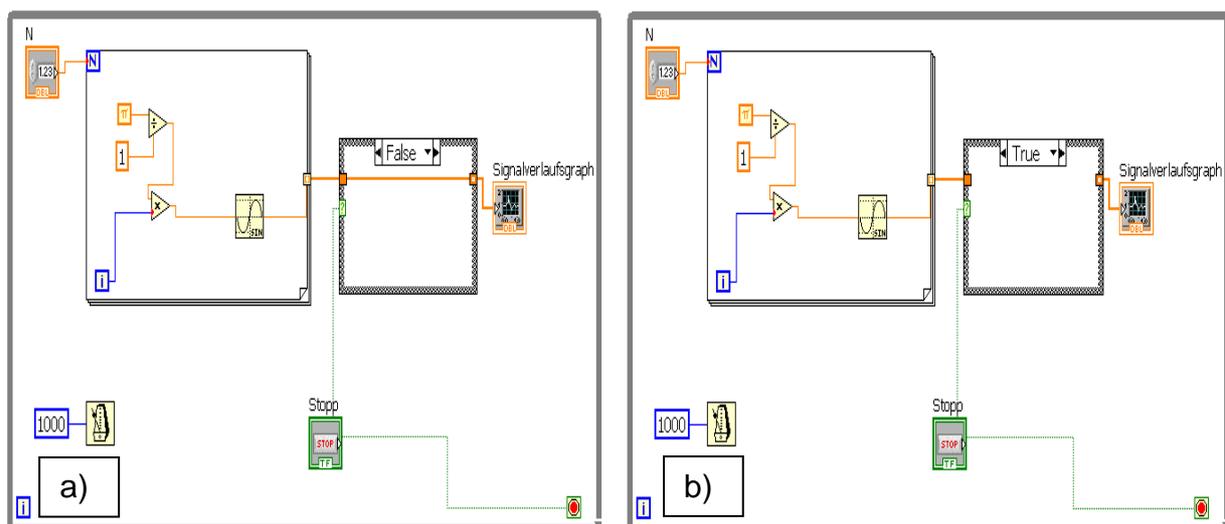


Abbildung 2.22: Erzeugen einer Sinuskurve im Fall a) FALSE / b) TRUE [GEO07]

2.2.3 Vergleich und Auswahl der Methodik

Alle Darstellungsmethoden beruhen jeweils auf einer eigenen Philosophie zur Visualisierung von Prozessen bzw. Programmabläufen. Sie weisen untereinander Parallelitäten sowie Unterschiede auf, die in der Tabelle 2.3 als Vergleich der drei Darstellungsmethoden zusammengefasst werden. Im Anschluss folgt eine Auswahl der Methodik für die Software-Entwicklung der Lasersteuerung.

Tabelle 2.3: Vergleich der drei Darstellungsmethoden

Typ Eigenschaft	Datenflussdiagramm nach DeMarco	Programmablaufplan	Struktogramm
Darstellungsform	Rechteck, Kreis, Pfeil	Raute, Pfeil, Rechteck, Kreis, Parallelogramm, etc.	Block, Dreieck
DIN	Nicht genormt	66001	66261
Fluss-Typ	Daten – bzw. Informationsfluss	Kontrollfluss	Daten – und Kontrollfluss
Anzahl der Sinnbilder	4	11	11
Algorithmus	Nicht vorhanden	Kontrollstrukturen	Kontrollstrukturen
Verwendung	Visualisierung von Prozessen	Implementierung von Programmen	Softwareentwurf
Detaillierungsgrad	beliebig	beliebig	beliebig
Schwierigkeitsgrad	mittel	mittel	hoch
Vorteil	Visualisierung von Prozessen	Einsatz von Kontrollstrukturen	Einsatz von Kontrollstrukturen
Nachteil	Mangel an Informationen von Datenstrukturen	Verzweigungen und Zusammenführungen beliebig kombinierbar	Besitzt nur einen Ausgang

Für die weitere Nutzung sind sowohl der Verwendungszweck als auch die jeweiligen Vor- und Nachteile von entscheidender Bedeutung. Im Rahmen der Aufgabenstellung wird zur Unterstützung der Software-Entwicklung die Ablaufstruktur Programmablaufplan nach [DIN 66001] ausgewählt. Gründe hierfür sind zum einen die gute Übersichtlichkeit des PAPs und zum anderen die Möglichkeit mehrere Ausgänge darzustellen.

3 Entwicklung und Implementierung der Lasersteuerung

Dieses Kapitel beschreibt die Entwicklung und Implementierung der Lasersteuerung, dabei wird zunächst der Unterschied zwischen der VE- und Lasersteuerung erläutert. Im Anschluss wird ein Konzept zur Steuerung des Bearbeitungslasers mit der Software LabVIEW entwickelt und umgesetzt. Diese basiert auf der vorhandenen Steuerung für die Vorschubeinheit, die den Status nach [RAN10] widerspiegelt.

3.1 Problemstellung

Um die Problemstellung näher zu erläutern, wird zunächst eine Ist-Aufnahme der aktuellen Steuerung durchgeführt. Die Ist-Aufnahme beschreibt dabei das aktuelle Vorgehen zur Bearbeitung von Werkstücken mittels Mikrobearbeitungseinheit. Lösungsansätze sowie Optimierungspotenzial werden durch eine Definition des Soll-Zustandes beschrieben.

Die Kernkomponente der Vorschubeinheit sind zwei Piezoaktoren, deren Auslenkung, durch die anliegenden Spannungen gesteuert werden kann. Ein zugehöriger Controller erzeugt die gewünschte Spannung, je nach anliegendem Spannungssignal (siehe Abbildung 3.1). Die Signale bzw. die Spannungswerte werden von einer Analog-Digital-Wandler-Karte (A/D-Wandler-Karte) an den Controller übergeben. Zum Verfahren der WZ-Aufnahme werden am Rechner, mittels der Software LabVIEW, Positionen bzw. Koordinaten eingegeben, woraus sich die benötigten Spannungswerte, einer definierten Auslenkung, für die Piezoaktoren ermittelt werden.

Zeitunabhängig von den Piezoaktoren wird der Bearbeitungslaser durch einen Frequenzgenerator gesteuert, der als Spannungsquelle für den Bearbeitungslaser dient. Zwischen diesen beiden Bausteinen befindet sich ein Oszilloskop, mittels dessen die Spannungssignale vom Frequenzgenerator überprüft werden können.

Die Ist-Aufnahme wird in Abbildung 3.1 vorgestellt.

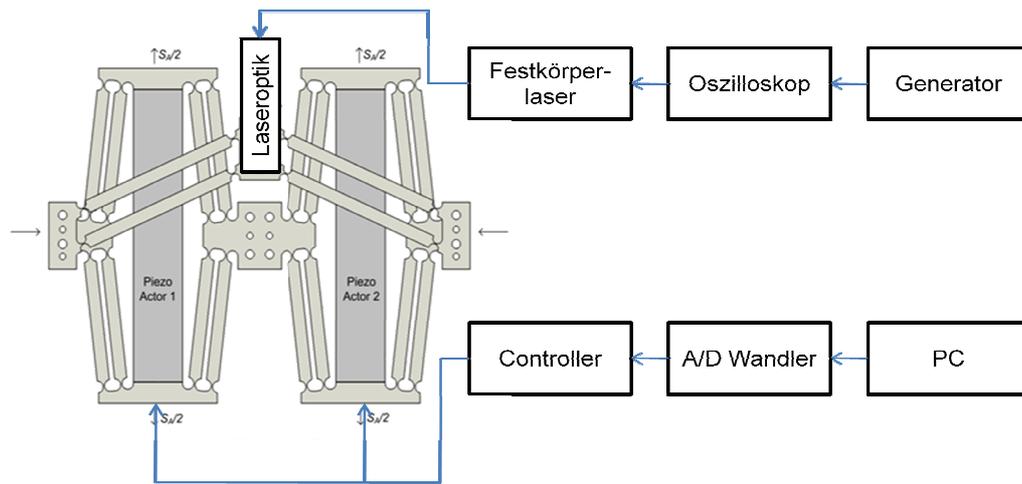


Abbildung 3.1: Ist-Zustand

Anhand der Abbildung 3.1 ist zu erkennen, dass die VE- und Lasersteuerung unabhängig voneinander ausgeführt werden. Dadurch entsteht eine zeitliche Asynchronität der beiden Steuerungen. Um diese Asynchronität zu umgehen, müssen der Frequenzgenerator und das Steuerungsprogramm am Rechner manuell und zeitgleich gestartet werden. In dieser manuellen Bedienung kann es erneut zu Ungenauigkeiten und Zeitversatz kommen, wodurch das gewünschte Ergebnis der Oberflächenbearbeitung negativ beeinträchtigt wird.

Eine weitere negative Eigenschaft dieser Steuerung ist die lange Bearbeitungszeit. Um eine Synchronisation von Vorschubeinheit und Bearbeitungslaser durch den Bediener zu ermöglichen, wird nur einmal pro Sekunde ein neuer Spannungswert an die Piezoaktoren übermittelt, die in Bruchteilen dieser Zeit die neue Position einnehmen. Während der verbleibenden Zeitspanne muss das Setzen eines Laserpulses, bis zur nächsten Spannungsänderung, erfolgen.

Das Konzept für die aktuelle Steuerung soll in Abbildung 3.2 als Soll-Zustand dargestellt werden.

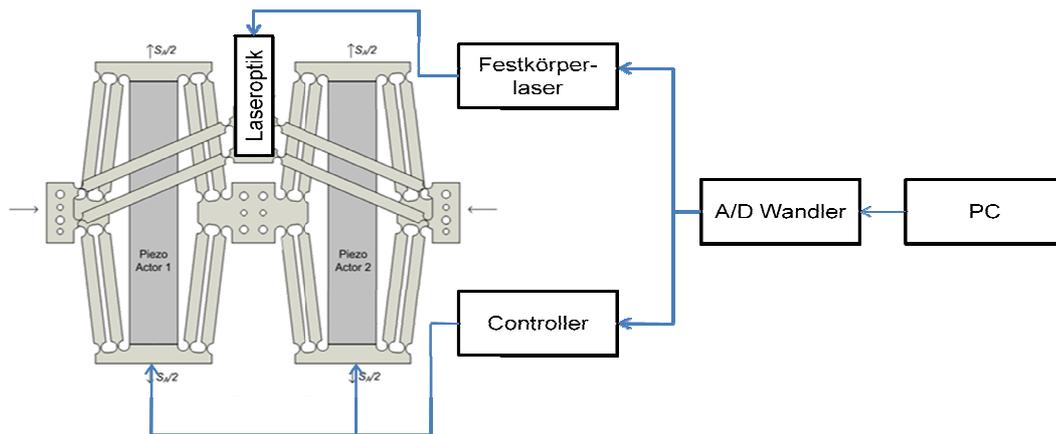


Abbildung 3.2: Soll-Zustand

Der Abbildung 3.2 ist zu entnehmen, dass der Frequenzgenerator sowie das Oszilloskop durch den Rechner ersetzt werden. Dadurch wird eine zeitliche kontinuierliche Ansteuerung von Vorschubeinheit und Bearbeitungslaser ermöglicht. Ziel dieser Optimierung ist zum einen eine Synchronisation von VE und Laser, zum anderen die Verkürzung der Bearbeitungszeit.

Als gemeinsame Steuerung muss eine Lasersteuerung entwickelt werden, die in der vorhandenen Steuerungsversion der VE von [RAN10] implementiert wird. Als nächster Schritt erfolgt die Entwicklung der Lasersteuerung mit Hilfe des Programmablaufplans und der Software LabVIEW.

3.2 Entwicklung der Lasersteuerung

Die Entwicklungssteuerung für einen Bearbeitungslaser wird in dem folgenden Abschnitt erläutert. Zunächst müssen technische Randbedingungen bzw. Spezifikationen über den verwendeten Bearbeitungslaser gesetzt bzw. erläutert werden, um eine Basis für die Entwicklung der Lasersteuerung zu schaffen. Ausgehend von der Soll- / Ist-Analyse zwischen der aktuellen Lasersteuerung und den Zielen dieser Arbeit wird die Funktionalität der Lasersteuerung ausführlich erläutert. Anschließend werden die einzelnen Unterprogramme sowohl anhand der Programmiersprache von LabVIEW als auch an dem dazugehörigen Programmablaufplan nach [DIN 66001] vorgestellt. Es ist dabei zu beachten, dass zur Entwicklung der Lasersteuerung nur Teilfunktionen bzw. Tools von LabVIEW vorgestellt werden, die im Kapitel 3.3 „Implementierung der Lasersteuerung“ der aktuellen VE-Steuerung hinzugefügt werden. Der Entstehung dieses Abschnittes folgt der hierarchischen Struktur der Lasersteuerung.

3.2.1 Randbedingung

In diesem Abschnitt werden die Anforderungen für den verwendeten Bearbeitungslaser, einen sog. Festkörperlaser, definiert, die in der Entwicklung der Lasersteuerung umgesetzt werden. Zunächst wird die Grundlage eines Festkörperlasers (FKL) kurz beschrieben.

Festkörperlaser besitzen als laseraktives Medium ein Laserkristall mit laseraktiven Ionen wie Neodym, Ytterbium, Erbium etc. [HÜG09]. Um eine Laserstrahlung zu erzeugen, müssen im Festkörperkristall (siehe Abbildung 3.3 – als Faser dargestellt), zur Erreichung der Energieaufnahme, Elektronen auf ein höheres Energieniveau optisch angeregt bzw. gepumpt werden [HÜG09]. Für das „Pumpen“ von Elektronen sorgt eine Pumplichtquelle, die aus mehrere Diodenbarren besteht.

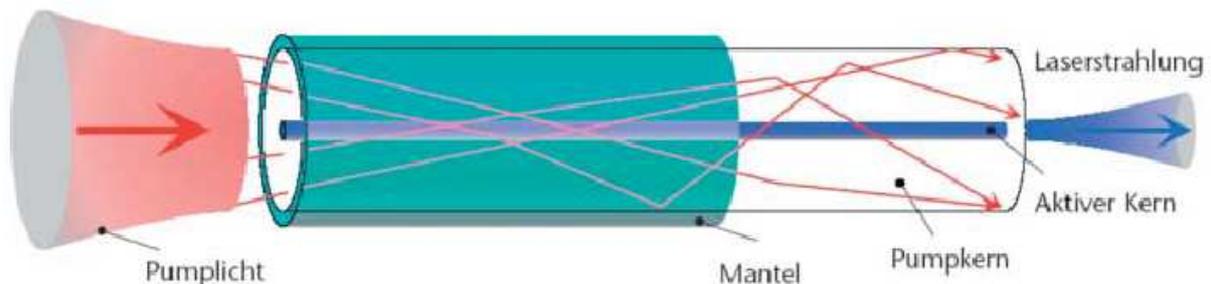


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung eines Festkörperlasers [NEP09]

Zur Bearbeitung von Werkstücken mit einem FKL, bieten sich zwei Betriebsarten an. Der Takt- oder der Dauerimpuls, dies bedeutet, dass der Festkörperlaser gepulst oder kontinuierlich betrieben werden kann (siehe Abbildung 3.4). Zur Erzeugung eines kontinuierlichen Laserstrahls wird von der Steuerung eine konstante Spannung gefordert. Für diese Betriebsart ist der FKL standardmäßig ausgelegt.

Ziel ist es gepunktete Linien auf einem Werkstück zu erzeugen. Dies kann nur mit einem gepulsten Laserstrahl erreicht werden. Dazu ist der Betrieb des FKL per Taktimpuls notwendig. Die Herausforderung liegt in der Modulation der Pumpquelle des FKLs. Die Realisierung der benötigten Modulation kann mit Hilfe der Software LabVIEW bewältigt und gelöst werden. Anlagenspezifisch darf das Signal für die Spannung der Pumplichtquelle 5 Volt als Höchstwert nicht überschreiten.

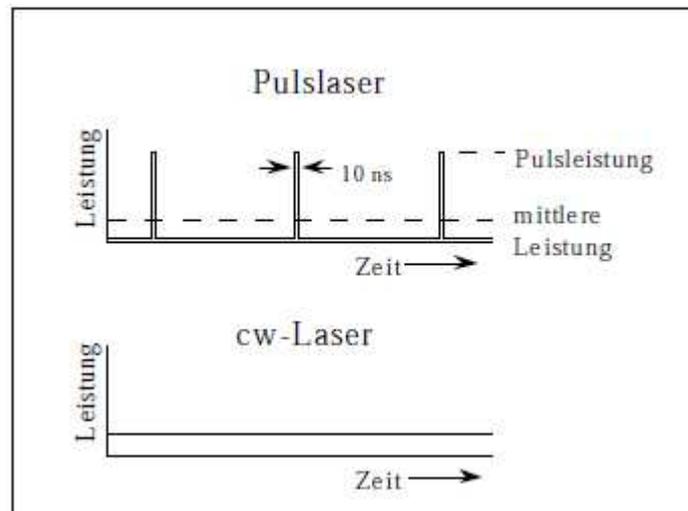


Abbildung 3.4: Betriebsarten eines Lasers [HER10]

3.2.2 Hauptprogramm

Im folgenden Abschnitt wird das Hauptprogramm der Lasersteuerung mit den dazugehörigen Unterprogrammen erläutert.

Bei Betrachtung der Abbildung 3.5 ist zu erkennen, dass das Hauptprogramm schon am Anfang mit einer Verzweigung startet. Dabei wählt der Bediener die Betriebsart aus, und entscheidet ob der Bearbeitungslaser im Dauer- oder Taktbetrieb arbeiten soll. Beim Taktbetrieb sowie beim Dauerbetrieb sind die Eingangsparameter Spannung, Schreibfrequenz, Anzahl der Pulse und Laser an / aus entscheidend. Im Taktbetrieb werden einzelne Laserpunkte auf einer vorgegebener Strecke erzeugt. Im Dauerbetrieb wird kontinuierlich einen Laserstrahl emittiert.

Die Eingangsparameter sind als ganze Zahlen anzugeben, die während der Oberflächenbearbeitung nicht geändert werden können.

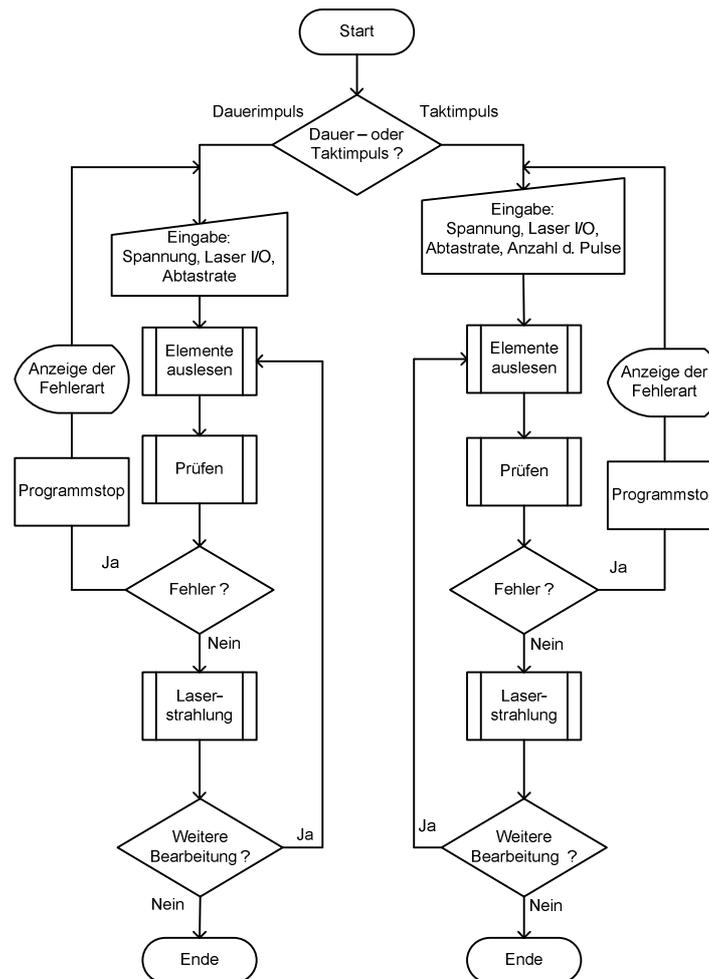


Abbildung 3.5: Hauptprogramm der Lasersteuerung

Nach der Entscheidung werden die Module Elemente auslesen, Prüfen und Laserstrahlung sequentiell durchgeführt.

Werden mehrere Arbeitsschritte mit dem Bearbeitungslaser angefordert, wiederholt das Hauptprogramm den Prozess solange bis alle Arbeitsschritte erledigt sind.

Im nächsten Unterkapitel werden die Operationen mit ihren Funktionen näher erläutert. Dabei wird die Erläuterung anhand einer tabellarischen Gegenüberstellung des PAPs und der Software LabVIEW ausgeführt.

3.2.3 Elemente auslesen

Das Modul „Elemente auslesen“ ist eines von drei Modulen aus dem Hauptprogramm. Durch den Nutzer werden Eingangswerte, die für die Steuerung des Lasers benötigt werden, im Frontpanel eingegeben. Die Aufgaben dieses Moduls ist das Auslesen der eingegebenen Werte und die Übergabe an nachfolgende Module.

Die Tabelle 3.1 visualisiert das Unterprogramm „Elemente auslesen“ mit den dazugehörigen Funktionen in LabVIEW. In der rechten Spalte der Tabelle 3.1 sind die Eingabefelder für die Steuerungsparameter des Bearbeitungslasers vom LabVIEW-Frontpanel dargestellt. Der „Dauer- /Taktimpuls“-Schalter bewirkt dabei eine boolesche Operation. Mittels dieses Schalters wird im Hauptprogramm die Betriebsart ausgewählt (siehe Abbildung 3.5). Eine Boolesche Operation ist eine mathematische Methode zur Darstellung von Beziehungen mit Hilfe von logischen Operatoren wie AND, OR oder NOT [GEO07]. In diesem Fall wird der logische Operator OR angewendet.

Weitere Eingabeparameter wie Spannung, Abtastrate und Anzahl der Pulse werden ohne zusätzliche Funktionen ins nächste Modul „Prüfen“ überführt. Nur das Eingabefeld „Laser I/O“ weist eine Besonderheit auf.

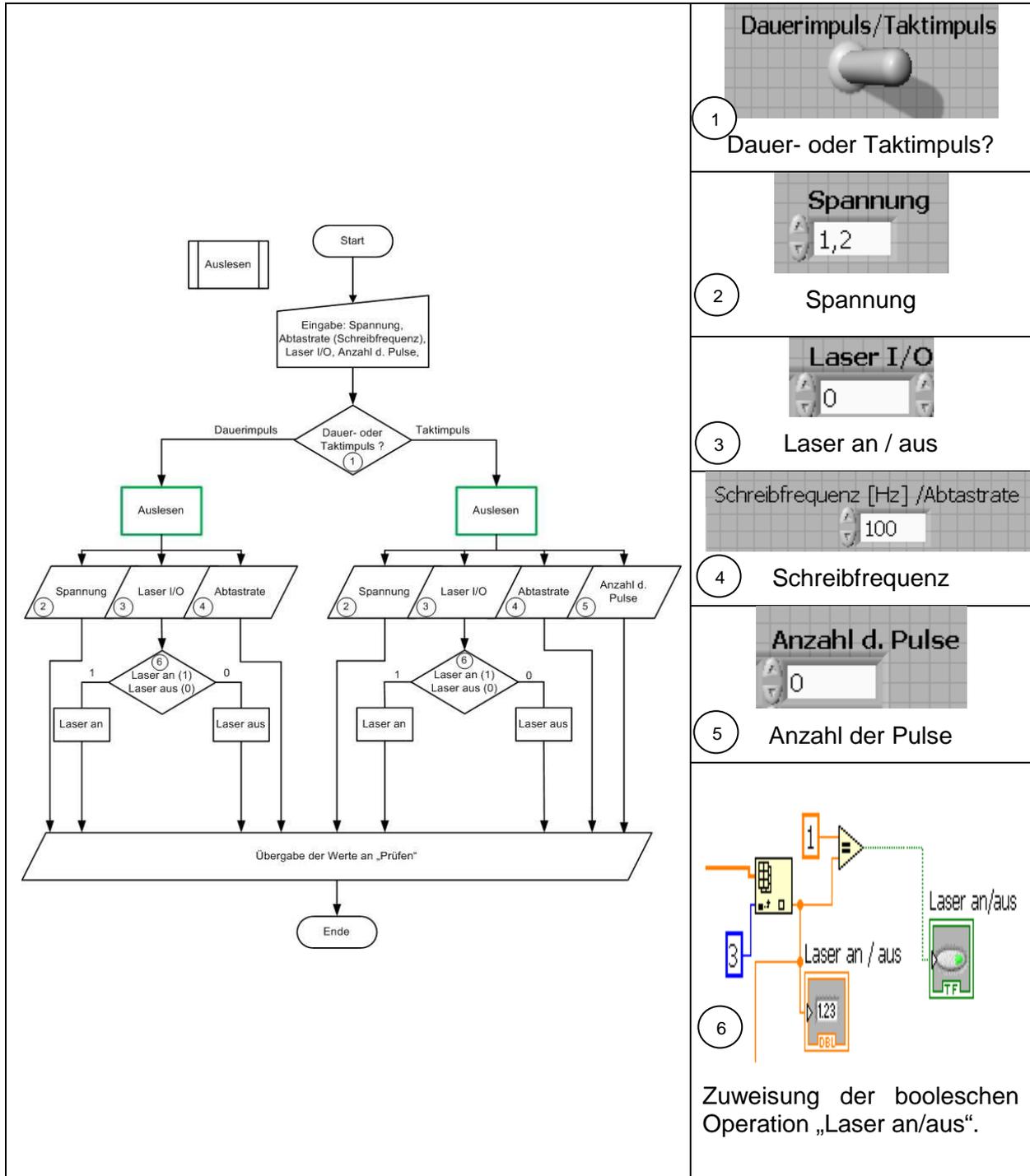
Um den Bearbeitungslaser bei jeder Verfahrbewegung an- oder ausschalten zu können, wird im Vorwege eine boolesche Variable in die Funktion „Auslesen“ implementiert. Dazu muss der Bediener im Eingabefeld „Laser I/O“ die Zahl 0 (0= Laser aus) oder 1 (1= Laser an) eingeben, damit die boolesche Operation eine Zuweisung für das Modul „Laserstrahlung“ ausführen kann. Das Symbol für den booleschen Operator wird im letzten Ausschnitt der Tabelle 3.1 als ein grüner Button dargestellt.

Im nächsten Unterkapitel wird das Modul zur Überprüfung der eingegebenen Werte vorgestellt.

Tabelle 3.1: Unterprogramm "Auslesen" mit den dazugehörigen Funktionen

Programmablaufplan

Eingabeparameter via LabVIEW



3.2.4 Prüfen

Nachdem das Modul „Elemente auslesen“ erfolgreich durchlaufen ist, werden die Eingabewerte Spannung, Laser an/aus und Anzahl der Pulse für beide Betriebsarten in die Funktion „Prüfen“ übergeben. Die Überprüfung dient als Unterstützung für den Nutzer, der beim fehlerhaften Eingeben von Werten durch eine Meldung auf die Ursache des Fehlers hingewiesen wird.

In der Tabelle 3.2 wird der Prüfungsprozess dargestellt. In der linken Spalte wird das komplette Unterprogramm „Prüfen“ per PAP dargestellt. Daraus werden in der rechten Spalte der Tabelle die Prüfungsfunktionen per LabVIEW abgeleitet.

Die eingegebene Spannung sowie das An- und Ausschalten des Lasers werden durch die Verhältnisse „größer gleich Null“ und „kleiner gleich“ kontrolliert. Es soll sowohl die Eingabe von negativen Werten sowie das Überschreiten des maximalen Wertes verhindern. Für die Benutzung des Bearbeitungslasers wird als Höchstwert 5 Volt gewählt, um evtl. Schäden am Bearbeitungslaser zu vermeiden [NEP09]. Für das An- und Ausschalten dürfen im Eingabefeld „Laser I/O“ (siehe Tabelle 3.1) ausschließlich die Zahlen 0 und 1 eingegeben werden.

Zusätzlich wird beim Taktimpuls die Anzahl der Pulse durch das Verhältnis größer-Null kontrolliert. Dadurch kann die Anzahl der Laserpulse ab einem Puls gewählt werden.

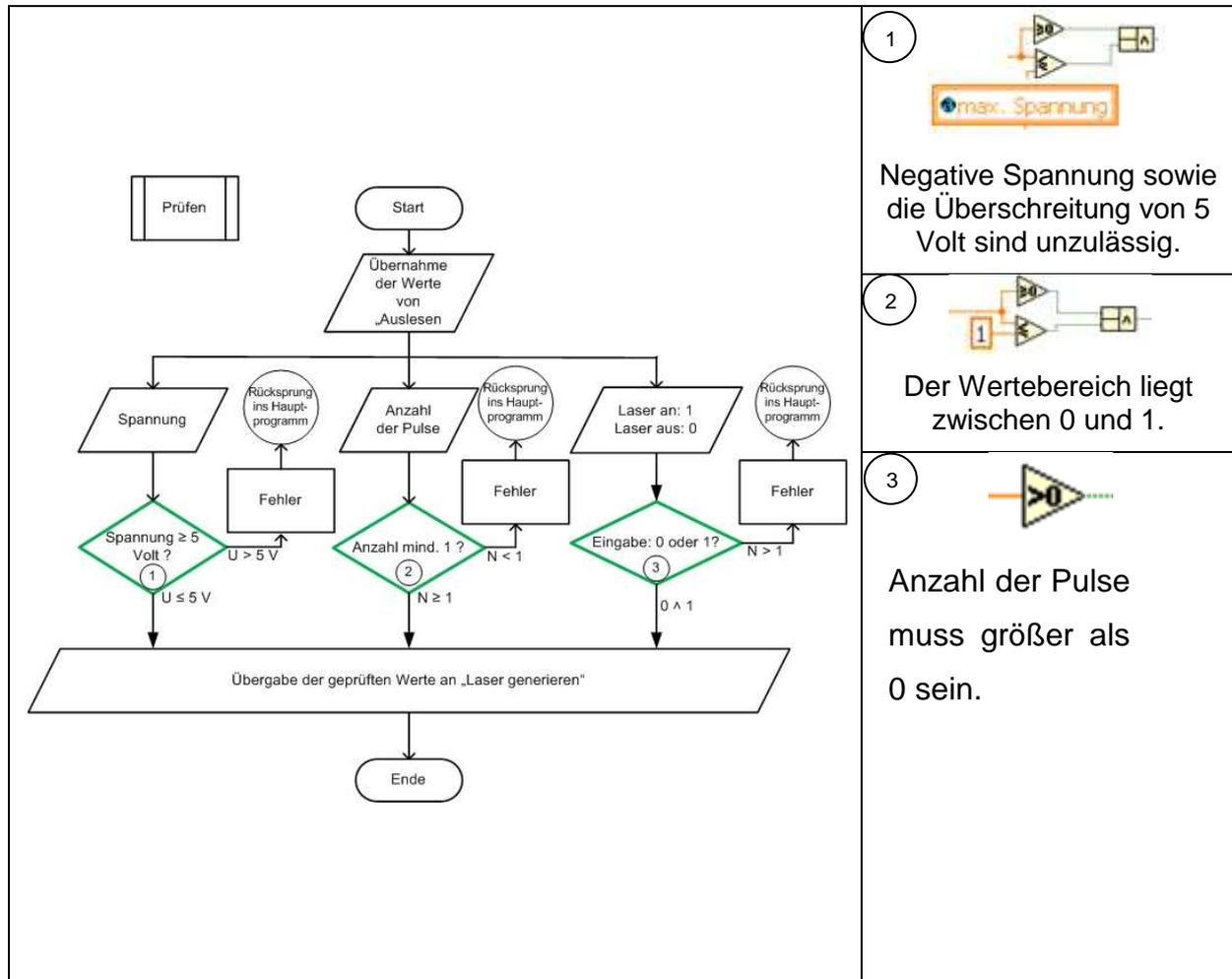
Wird eine der Bedingungen nicht erfüllt, liefert das Unterprogramm einen Signalton mit einer Fehlermeldung auf dem Bildschirm. Beim Anzeigen des Fehlertyps wird das Hauptprogramm unterbrochen.

Um aus sämtlichen Eingangsparametern ein Signal für den Bearbeitungslaser zu erzeugen, wird im nächsten Modul „Laserstrahlung“ die Signalverarbeitung vorgestellt.

Tabelle 3.2: Unterprogramm "Prüfen" mit den dazugehörigen Funktionen

Programmablaufplan

Eingabeparameter via LabVIEW



3.2.5 Laserstrahlung

Im Unterprogramm „Laserstrahlung“ (siehe Tabelle 3.3) wird aus den Daten der Eingabefelder Spannung und Laser I/O in Kombination mit einem Funktionsgenerator ein Signal für den Takt- oder Dauerbetrieb erzeugt. Ein Funktionsgenerator, in LabVIEW als eigenständiger Funktionsblock vorhanden, erzeugt elektrische Spannung mit unterschiedlichen Verläufen, insbesondere Sinus-, Rechteck-, Dreieck- und Sägezahnformen, mit einstellbarer Frequenz und Amplitude [GEO07].

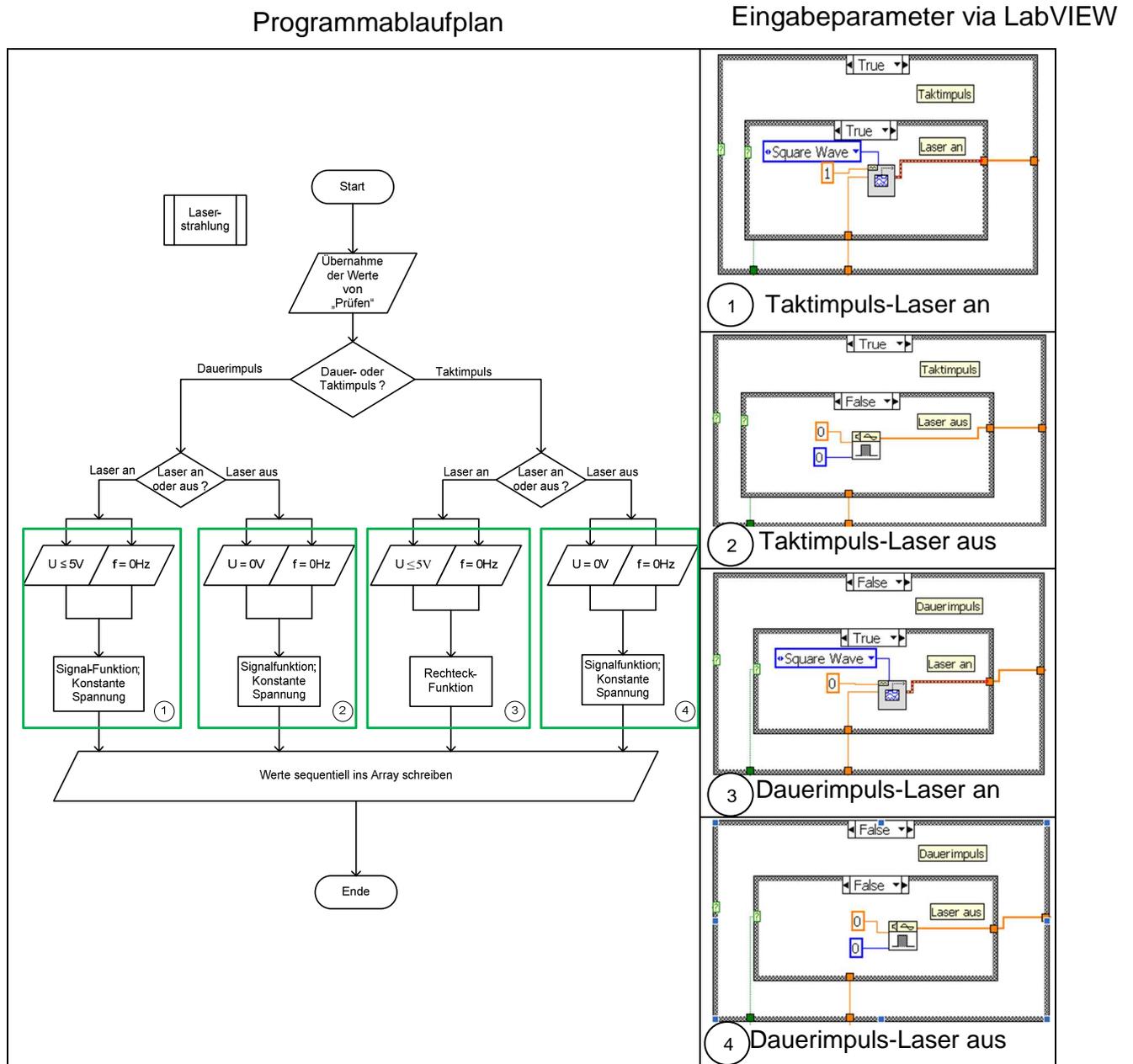
Um den Bearbeitungslaser im Taktbetrieb zu betreiben, wird im Funktionsgenerator die Kurvenform „Square Wave“ (dt. Rechteckverlauf) ausgewählt. Bei kurzer Pulsdauer und erhöhter Frequenz ist das Rechtecksignal, das zwischen zwei Amplituden- bzw. Spannungswerten hin und her schaltet, für diese Applikation geeignet. Die Frequenz wird auf einen konstanten Wert von 1 Hertz gesetzt. Der Grund dafür wird im Kapitel 3.4 „Implementierung der Lasersteuerung“ erläutert.

Soll der Laser im Dauerbetrieb arbeiten, wird derselbe Funktionsgenerator mit der gleichen Option „Rechtecksignal“ verwendet, der Frequenzwert wird dabei auf 0 Hertz gesetzt, woraus eine konstante Spannung resultiert.

Die Realisierung von „Laser an / aus“ sowie „Dauer- / Taktimpuls“ wird durch die Verwendung der CASE-Strukturen unterstützt. Dabei besitzt jeder Betrieb zwei ineinander geschachtelte CASE-Strukturen (siehe Tabelle 3.3 – linke Spalte). Die Einstellungen werden zum einen durch den „Dauer-/Taktimpuls“-Schalter auf dem Frontpanel und zum anderen durch die boolesche Variable, die in Kapitel 3.2.2 „Auslesen“ vorgestellt wurde, durchgeführt. Um eine kurzzeitige Deaktivierung des Bearbeitungslasers zu ermöglichen, werden im Funktionsgenerator die Amplitude- und Frequenzwerte auf Null gesetzt (siehe Tabelle 3.3).

Aus dem Funktionsgenerator werden die Spannungswerte sequentiell in ein Array überführt, das an das Modul „Schreiben“ übergeben wird. Die Erläuterung des Moduls „Schreiben“ erfolgt im Kapitel 3.4 „Implementierung der Lasersteuerung“.

Tabelle 3.3: "Laserstrahlung" mit den dazugehörigen Funktionen



3.3 Steuerungsversion der Vorschubeinheit

In diesem Abschnitt wird die vorhandene Steuerungsversion der Vorschubeinheit mit ihren Modulen beschrieben, um die im vorherigen Kapitel entwickelten Funktionselemente der Lasersteuerung in die aktuelle Steuerungsversion zu implementieren. Aufbau und Entwicklung der VE-Steuerung stammt überwiegend von [RAN10]. Die Entwicklung des Steuerprogramms wurde mit der Software LabVIEW Professional Development System von National Instruments in der Version 9.0 (32-Bit) erstellt [RAN10].

Die Abbildung 3.6 stellt die vorhandene Steuerungsversion der Vorschubeinheit anhand eines PAP dar. Zum Verfahren der VE werden die Positionen mittels einer Tabelle eingegeben. Weiterhin setzt der Nutzer die Anzahl der einzulesenden Positionen mit Hilfe der Funktion „Anzahl der Koordinaten“ fest (siehe Abbildung 3.6). Dies bedeutet, dass in der entsprechenden Schleifeniteration jeweils eine Position zeilenweise aus der Koordinateneingabe eingelesen wird. Werden die Bausteine „Anzahl der Koordinaten“ und „Koordinateneingabe“ manuell vom Nutzer ausgeführt (siehe Abbildung 3.7), werden im ersten Modul „Einlesen der Koordinaten“ die eingegebenen Positionen sequentiell und zeilenweise in ein Array geschrieben. Im Anschluss werden die Positionen im Modus „Elemente auslesen“ aus dem Array selektiert und an die folgenden Module weitergegeben.

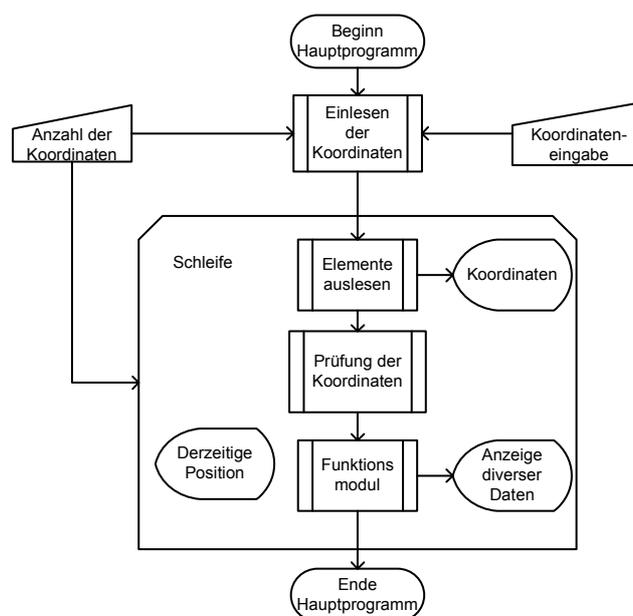


Abbildung 3.6: VE-Steuerung via Programmablaufplan [RAN10]

Um Koordinaten bzw. Positionen auszuschließen, die außerhalb des Bearbeitungsraumes liegen, werden die Koordinaten im Modus „Prüfung der Koordinaten“ darauf kontrolliert, ob die Werte die maximalen Abmessungen des Arbeitsraumes überschreiten [RAN10] (Vgl. Abbildung 2.10).

Das „Funktionsmodul“ beinhaltet mehrere Funktionsabschnitte, die die Steuerung der zwei Piezoaktoren und damit der Vorschubeinheit ermöglichen. Im ersten Schritt werden die eingegebenen Koordinaten in Spannungswerte konvertiert, indem eine Umrechnung mit definierten Konstanten, die sich aus der Geometrie des Vorschubrahmens, dem Auflösungsvermögen des Controllers und einer vorhergehenden FEM-Berechnungen ergeben, erfolgt [RAN10].

Anschließend können die Spannungswerte in eine Kreiskoordinaten- oder Rampenfunktion übergeben werden. Sofern die Positionseingabe des Radius abweichend einen Wert von Null aufweist, wird die Kreiskoordinatenfunktion aufgerufen. Ansonsten werden mittels der Rampenfunktion diagonale, waagerechte sowie senkrechte Strecken verfahren.

Im letzten Schritt des Funktionsmoduls werden die errechneten Kreis- oder Rampenkoordinaten in einen Schreibmodus übergeben, der die Werte mittels einer A/D-Wandler-Karte an den Piezoaktoren weiterleitet. Der Schreibmodus kann durch die Anzahl der geschriebenen Werte und der Schreibgeschwindigkeit am Frontpanel gesteuert werden (siehe Abbildung 3.7).

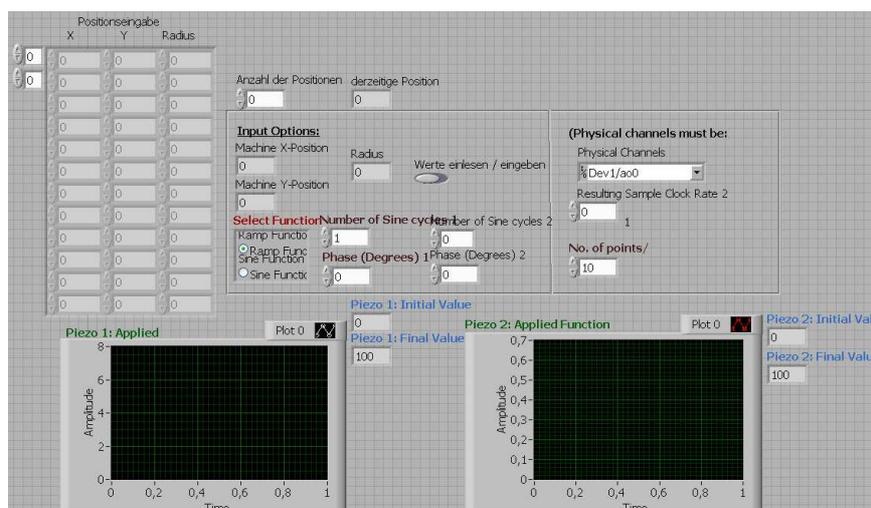


Abbildung 3.7: Frontpanel der Vorschubeinheit-Steuerung [RAN10]

3.4 Implementierung der Lasersteuerung

Dieses Kapitel beschreibt die Implementierung der entwickelten Lasersteuerung (siehe Kapitel 3.2 „Entwicklung der Lasersteuerung“) in die aktuelle VE-Steuerung. Dabei werden nur die Unterprogramme bzw. SubVIs näher erläutert, in denen im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Teilfunktionen der Lasersteuerung eingesetzt werden. Um die Asynchronität zwischen der VE- und Lasersteuerung zu beheben, wird im Kapitel 3.4.4 „Synchronisation“ eine Applikation präsentiert, welche die beiden Steuerungen miteinander verknüpft.

3.4.1 Elemente auslesen

In der Koordinateneingabe (siehe Abbildung 3.8) werden Eingangswerte sowohl für die Steuerung des Lasers als auch für die Steuerung der Vorschubeinheit eingegeben. Dabei besitzt dieses Modul die Aufgabe, die eingegebenen Werte auszulesen und an nachfolgende Module zu übergeben. In jeder Schleifeniteration des Hauptprogramms wird eine Zeile der Koordinateneingabe verarbeitet. Die ersten drei Spalten der Koordinateneingabe (X, Y, Radius) dienen ausschließlich der Steuerung der Piezoaktoren (siehe Abbildung 3.8). In der vierten Spalte wird das separate An- und Ausschalten des Lasers definiert und in die fünfte Spalte wird die Anzahl der Pulse zum Taktbetrieb des Lasers eingefügt. Die eingegebenen Werte, aus der Koordinatentabelle, werden im Blockdiagramm in ein Array überführt, wiederum werden diese Werte durch das Modul „Elemente auslesen“ selektiert.

Positioneingabe					
	X	Y	Radius	Laser I/O	Anzahl d. Pulse
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0

Abbildung 3.8: Koordinateneingabe der Vorschubeinheit- und Lasersteuerung

Da die Eingabefelder „Laser I/O“ und „Anzahl der Pulse“ in die Positionseingabe der Vorschubeinheit implementiert wurden (siehe Abbildung 3.8) müssen sie aus dem Array des Moduls „Elemente einlesen“ (siehe Kapitel 3.3) mittels einer gestapelten

Sequenz separiert werden. Im Modus „Elemente auslesen“ werden die ersten drei Sequenzen (0te-,1te-,2te-Sequenz) der VE-Steuerung zugewiesen.

In der dritten Sequenz erfolgt (Abbildung 3.9 – links) eine Prüfung, ob in der vierten Spalte der Koordinateneingabe der Wert eins vorliegt. Dies dient zur Steuerung der Module „Laserstrahlung“, „Synchronisation“ und „Schreiben“ mittels einer booleschen Operation (Vgl. Kapitel 3.2.3) die die jeweiligen CASE-Strukturen ansteuert [RAN10].

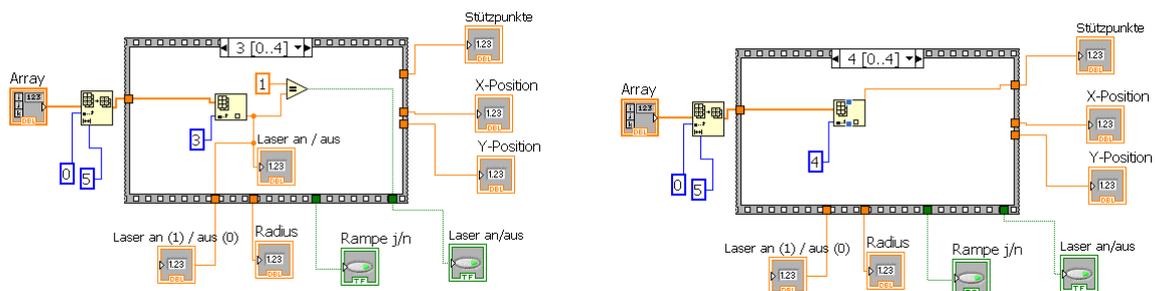


Abbildung 3.9: "Laser an/aus" (links)/"Anzahl der Pulse" (rechts)

3.4.2 Prüfen

Im Modul „Prüfen“ (siehe Abbildung 3.10) werden neben der Kontrolle der Koordinaten für den Arbeitsraum, auch die Prüfung der Parameter für den Bearbeitungslaser, durchgeführt. Die implementierten Teilfunktionen für die Prüfung des Bearbeitungslasers wurde in Kapitel 3.2.4 explizit erläutert und vorgestellt und in die Kontrolle der MBE-Steuerung implementiert (siehe Abbildung 3.10- roter Kasten).

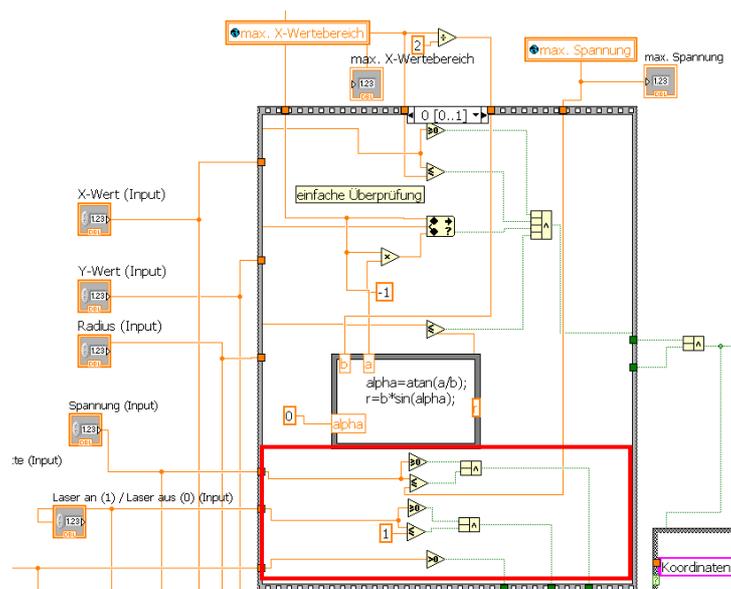


Abbildung 3.10: Modul "Prüfen" im Blockdiagramm

Dabei werden die Prüfelemente „Laser an / aus“ und „Spannung“ mit einer Mehrfacharithmetik gekoppelt, die es ermöglicht die Operatoren AND, OR oder XOR von mehr als zwei booleschen Variablen miteinander zu verknüpfen [MÜT09].

Liefert einer der Prüfoperatoren einen FALSE-Fall, wird durch ein Signalton und einer Meldung dem Bediener signalisiert, um welchen Fehlertyp es sich handelt (siehe Abbildung 3.11). Gleichzeitig werden die Werte nicht weiter übergeben und die Schleifeniteration bzw. die VE- und Lasersteuerung wird beendet. Andernfalls werden die eingegebenen Werte unverändert an das „Funktionsmodul“ weitergegeben.

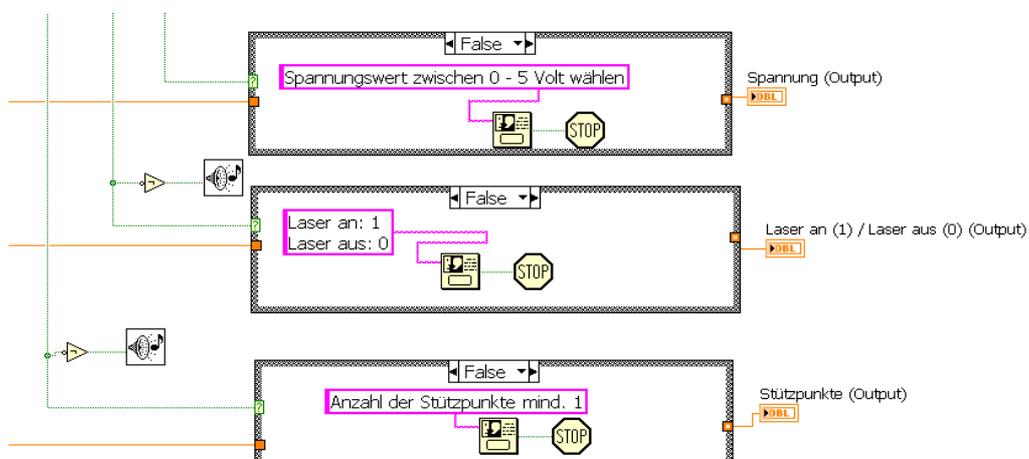


Abbildung 3.11: Fehlertypen

3.4.3 Funktionsmodul

Dieses Steuerungsmodul (siehe Abbildung 3.12) stellt den Kern der Steuerungssoftware dar. Infolgedessen ist der Aufbau dieser SubVI komplexer und verschachtelter z.B. aufgrund mehrerer CASE-Strukturen, Sequenzen, etc. [RAN10]. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit nicht die Funktionalität und der Aufbau des gesamten Funktionsmoduls erläutert, sondern nur die Sub-Module „Laserstrahlung“ und „Synchronisation“ beschrieben.

Bei Betrachtung der Abbildung 3.12 ist zu erkennen, dass das Unterprogramm „Laserstrahlung“ (roter Kasten) sowohl in die Rampen- als auch in die Kreiskoordinatenfunktion implementiert wurde. Unabhängig von der Lage und Position des Moduls werden die Daten parallel und zeitgleich zu der VE-Steuerung verarbeitet.

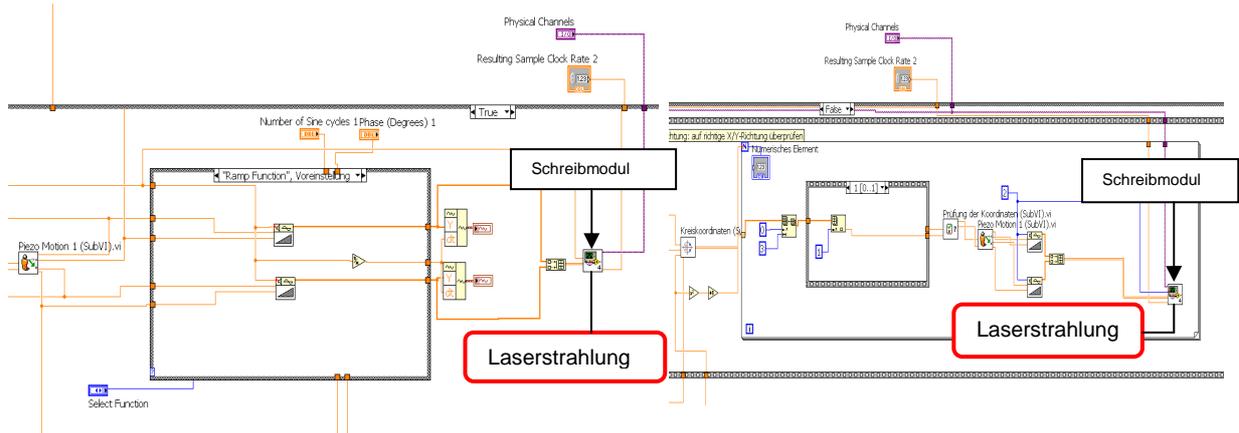


Abbildung 3.12: Rampenfunktion (links)/Kreiskoordinatenfunktion (rechts)

Im Modul „Laserstrahlung“ werden die Entscheidungskriterien „Dauer-oder Taktimpuls“ sowie „Laser an / aus“ durch CASE-Strukturen realisiert (siehe Abbildung 3.11 und Abbildung 3.12). Die erste CASE-Struktur bestimmt die Betriebsart für den Bearbeitungslaser und in der zweiten CASE-Struktur wird, je nach Eingabe in der Koordinatentabelle, der Laser an- oder ausgeschaltet. Weitere Erläuterungen zum Modul „Laserstrahlung“ werden in Kapitel 3.2.4 vorgestellt.

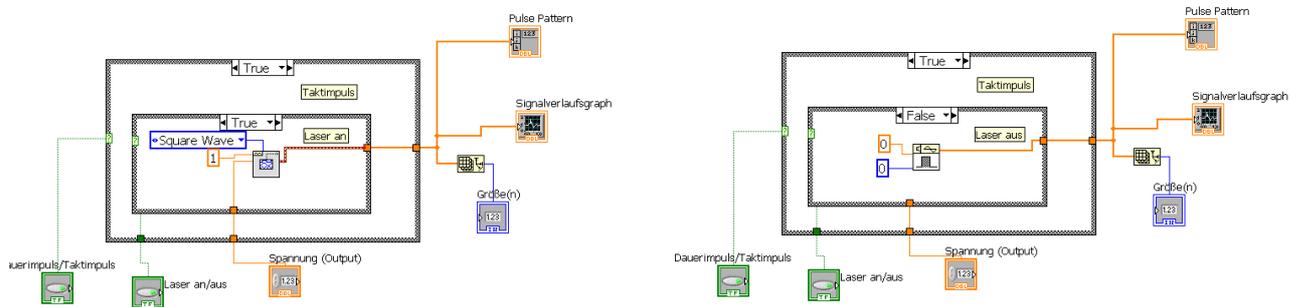


Abbildung 3.13: Taktbetrieb: Laser an (links)/Laser aus (rechts)

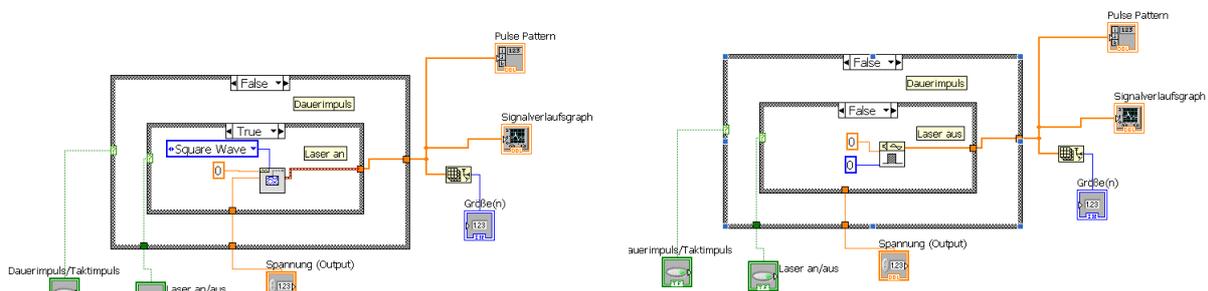


Abbildung 3.14: Dauerbetrieb: Laser an (links)/Laser aus (rechts)

Die Resultate aus den Funktionsgeneratoren sind mehrere, hintereinander, erzeugte Spannungswerte, die in ein Array geschrieben werden.

Die Zusammenführung der Signalauswertung der Piezoaktoren (siehe Kapitel 3.3) und des Bearbeitungslasers wird im folgenden Kapitel „Synchronisation“ verarbeitet, um beide Steuerungsmodule synchron zu steuern.

3.4.4 Synchronisation

Im Kapitel „Synchronisation“ wird die Einführung der Verknüpfung zwischen der VE- und Lasersteuerung aufgezeigt. Dabei wird die Umsetzung der Synchronität beim Dauer- und Taktbetrieb näher erläutert.

Beide Steuerungen werden in ein Array (Größe $3 \times n$) implementiert, die aus den Komponenten Piezoaktor 1 und 2 sowie Laser (siehe Tabelle 3.4) bestehen. Die Spannungswerte der einzelnen Komponenten werden spaltenweise im Array geschrieben. Die Soll- bzw. Ziel-Spannungswerte der Piezoaktoren werden in den ersten beiden Zeilen definiert. In der dritten Zeile des Arrays wird die De- oder Aktivierung des Bearbeitungslasers festgelegt.

Der Aufbau bzw. die Verknüpfungsidee wird im Dauer- oder Taktbetrieb unterschiedlich programmiert. Für beide Betriebsarten wird die Struktur des Synchronisations-Arrays in der Tabelle 3.4 und Tabelle 3.5 vorgestellt.

Tabelle 3.4: Synchronisations-Array beim Dauerbetrieb

Piezo1	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_{n+1}
Piezo2	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y
Laser	Z_1								

X:= Spannungswert des ersten Piezoaktors

Y:= Spannungswert des zweiten Piezoaktors

Z:= Spannungswert des Bearbeitungslasers

Zur Umsetzung des Synchronisations-Array im Dauerbetrieb (siehe Tabelle 3.4) müssen die Signale aus den Modulen „Laserstrahlung“ und „Koordinaten- oder Rampenfunktion“ unverändert in ein Array importiert werden (siehe Abbildung 3.15). Dadurch wird eine Oberflächenbearbeitung im Dauerbetrieb, ohne zwischenzeitliche Unterbrechung, gewährleistet.

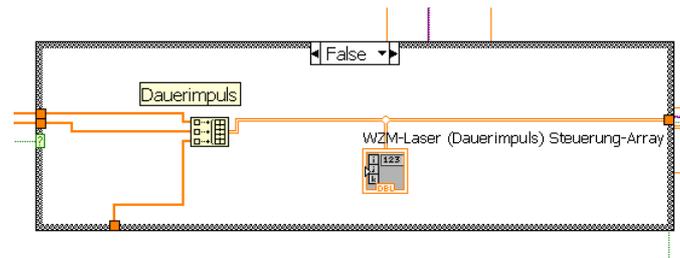


Abbildung 3.15: Synchronisations-Array beim Dauerbetrieb

Anders als im Dauerbetrieb werden die Spannungswerte der Piezoaktoren im Synchronisations-Array des Taktbetriebs pro Spalte dupliziert (siehe Tabelle 3.5). Zusätzlich wird zwischen den Spannungswerten des Lasers eine konstante Spannung von 0 Volt implementiert (siehe Tabelle 3.5).

Das Ziel ist es die Pumplichtquelle zu modulieren, um den Pulsbetrieb des Bearbeitungslasers zu ermöglichen (Vgl. Abbildung 3.4). Dafür benötigt der Bearbeitungslaser eine Signalfolge, die eine pulsierende Laserstrahlung erzeugt. Das Aussetzen der Laserstrahlung erfolgt mittels des Setzens der Erzeugerspannung auf 0 Volt. Diese Signalfolge der Laserstrahlung wird in Tabelle 3.5 als Synchronisations-Array im Taktbetrieb vorgestellt.

Tabelle 3.5: Synchronisations-Array beim Taktbetrieb

Piezo1	X_1	X_2	X_2	X_3	X_3	X_4	X_4	X_{n+1}	X_{n+1}
Piezo2	Y_1	Y_2	Y_2	Y_3	Y_3	Y_4	Y_4	Y_{n+1}	Y_{n+1}
Laser	Z_1	0	Z_1	0	Z_1	0	Z_1	0	Z_1

X:= Spannungswert des ersten Piezoaktors

Y:= Spannungswert des zweiten Piezoaktors

Z:= Spannungswert des Bearbeitungslasers

0:= Deaktivierung des Bearbeitungslasers

Zur Herstellung dieses Synchronisations-Arrays (siehe Tabelle 3.5) werden im Voraus zwei Sub-Module programmiert, die zum einen die Spannungswerte der Piezoaktoren (PI) duplizieren und zum anderen das Hinzufügen der Konstante (0 Volt) zwischen den Spannungswerten des Bearbeitungslasers ermöglicht. Beide Sub-Module befinden sich in einer CASE-Struktur, die mittels des „Dauer-/Taktimpuls“-Schalters im Frontpanel gesteuert wird (siehe Abbildung 3.16).

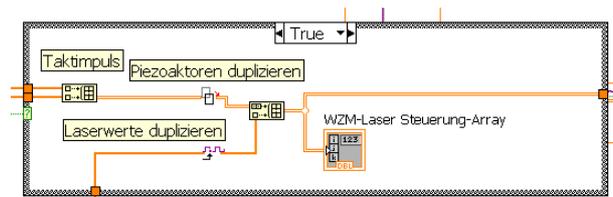


Abbildung 3.16: Synchronisations-Array beim Taktbetrieb

Zunächst wird die Entwicklung der beiden Sub-Module charakterisiert, um im darauffolgenden Schritt sämtliche Spannungswerte des Dauer – oder Taktbetriebs ins Schreibmodul zu importieren.

Mittels des Sub-Moduls „PI-Werte duplizieren“ (siehe Abbildung 3.17) werden die Spannungswerte aus dem Modul „Kreiskoordinaten“ oder „Rampenfunktion“ spaltenweise reproduziert. Um dies zu ermöglichen, werden die Funktionen „Teil-Array entfernen“ und „In Array einfügen“ im Blockdiagramm benötigt (siehe Abbildung 3.17). Daraus entsteht eine duplizierte Spalte, die anschließend mit dem Index $n+1$ inkremental in die nächst freiliegende Spalte eingefügt wird (siehe Abbildung 3.17). Sobald die Spannungswerte in der richtigen Sequenz dupliziert werden (siehe Abbildung 3.18), werden sie als ein Baustein in das Synchronisations-Array weitergegeben.

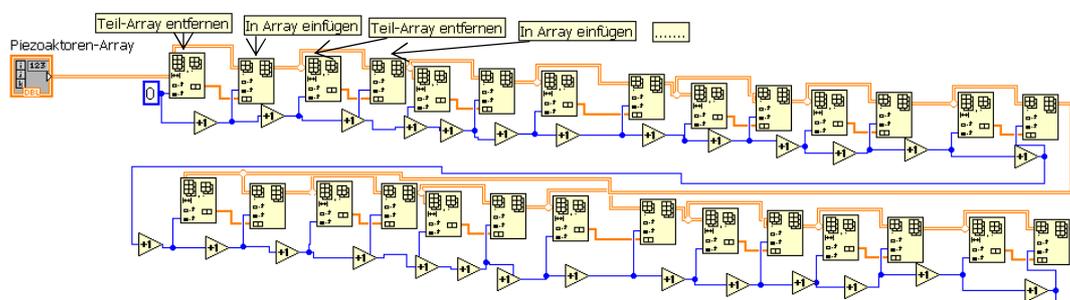


Abbildung 3.17: Ausschnitt des Sub-Moduls "PI-Werte duplizieren"

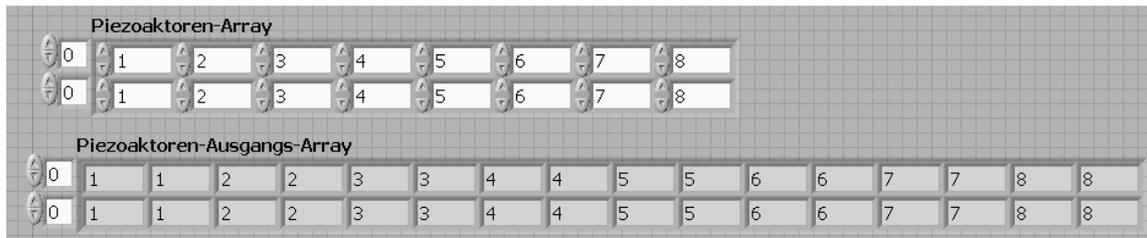


Abbildung 3.18: Frontpanel "PI-Werte duplizieren"

Der zweite Teil des Synchronisations-Arrays ist das Sub-Modul „Laserwerte duplizieren“. Die Aufgabe dieses Sub-Moduls besteht darin Nullen, zwischen die eingehenden Spannungswerte, des Moduls „Laserstrahlung“, einzufügen.

Nachdem die Spannungswerte aus dem Modul „Laserstrahlung“ in das Sub-Modul „Laserwerte duplizieren“ geschrieben wurden, erfolgt in einer FOR-Schleife das Hinzufügen der Nullen (siehe Abbildung 3.19). Abhängig von der Array Größe des Moduls „Laserstrahlung“ werden zunächst Nullen inkremental ins Array eingefügt. Danach werden die Funktionen „Array indizieren“ und „In Array einfügen“ im Wechsel aufgerufen. Zur exakten Positionierung der Ziffer 0 zwischen Spannungswerten des Lasers werden sie in der Funktion „In Array einfügen“ jeweils mit einer ungeraden Ziffer adressiert (siehe Abbildung 3.19).

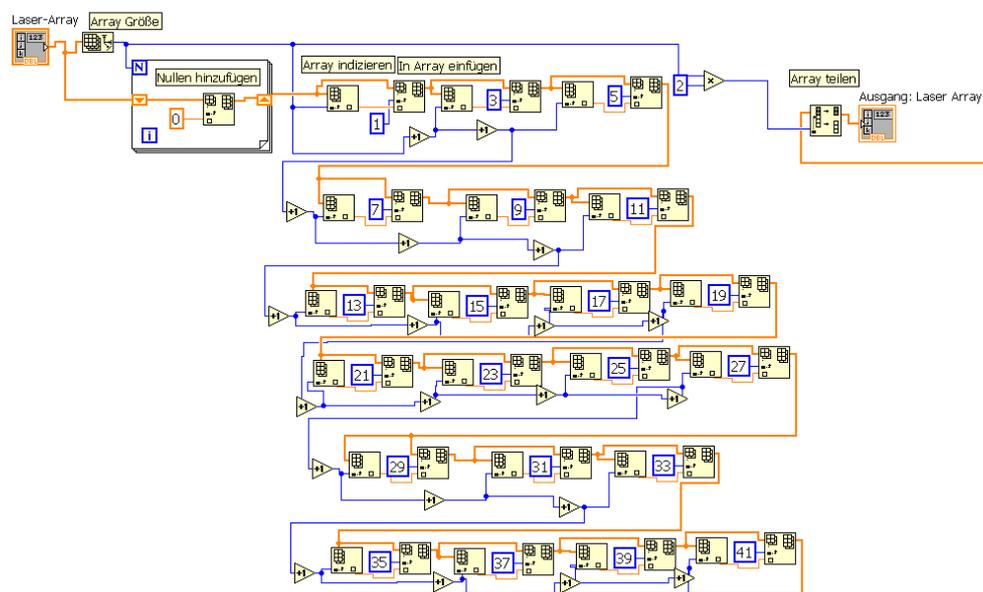


Abbildung 3.19: Ausschnitt des Sub-Moduls "Laserwerte duplizieren"

Die Ausführung des entwickelten Sub-Moduls wird in der Abbildung 3.20 als Beispiel dargestellt.

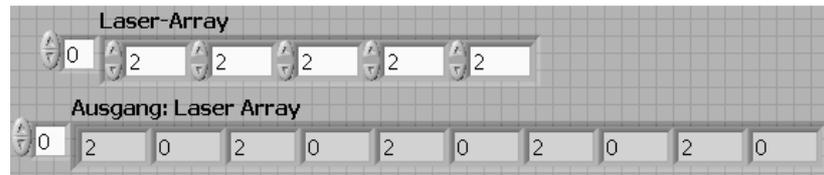


Abbildung 3.20: Frontpanel "Laserwerte duplizieren"

Anschließend wird das Sub-Modul „Laserwerte duplizieren“ gleichzeitig mit dem Sub-Modul „PI-Werte duplizieren“ ins Synchronisations-Array überführt. Um eine einheitliche Steuerung der Vorschubeinheit und des Bearbeitungslasers zu realisieren, wird das Synchronisations-Array an das Schreibmodul weitergegeben.

3.4.5 Schreiben

Das vorliegende Sub-VI (siehe Abbildung 3.21 und Abbildung 3.22) öffnet einen Task mit den Adressen der Ausgabekanäle. Dieser Task schreibt das gesamte eingehende Array auf die Ausgabekanäle. Dies erfolgt in einer Taktung, die im Frontpanel unter dem Eingabefeld „Schreibfrequenz“ (siehe Tabelle 3.1) eingestellt wird. Der Schreibvorgang des Moduls und somit der Task bleibt solange aktiv, wie der gesamte Vorgang der zu schreibenden Spannungswerte des Synchronisations-Array dauert [RAN10]. Zur Wiederverwendung des Moduls müssen die Werte nach Abschluss des Schreibvorgangs gelöscht werden.

Infolge der Duplizierung der Piezoaktoren- und Laserwerte im Modus „Synchronisation“ muss die Anzahl der Pulse, die im Schreibmodus als „Anzahl der schreibenden Werte“ fungieren, dem Synchronisations-Array angepasst werden. Dies wird mittels eines mathematischen Operators in einer CASE-Struktur realisiert (siehe Abbildung 3.22 – TRUE Fall).

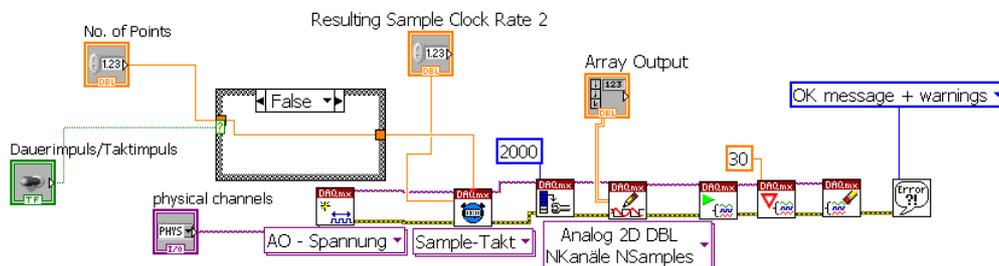


Abbildung 3.21: Schreibvorgang im Dauerbetrieb

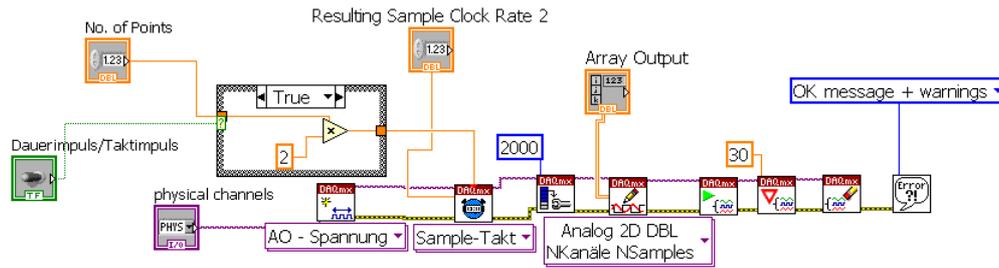


Abbildung 3.22: Schreibvorgang im Taktbetrieb

3.4.6 Frontpanel

Das Frontpanel (siehe Abbildung 3.23) visualisiert die Ein- und Ausgabeelemente der Vorschubeinheit- und Lasersteuerung. In der Bedieneroberfläche können die Einstellungen bezüglich der Koordinatensteuerung und Lasersteuerung vorgenommen werden. Zur Erläuterung des Frontpanels werden nur die relevanten Funktionen beschrieben, die bereits in Kapitel 3.2.3 „Elemente auslesen“ erwähnt wurden. Weitere Erläuterungen zur Bedienung des Frontpanels befinden sich im Kapitel 3.3.

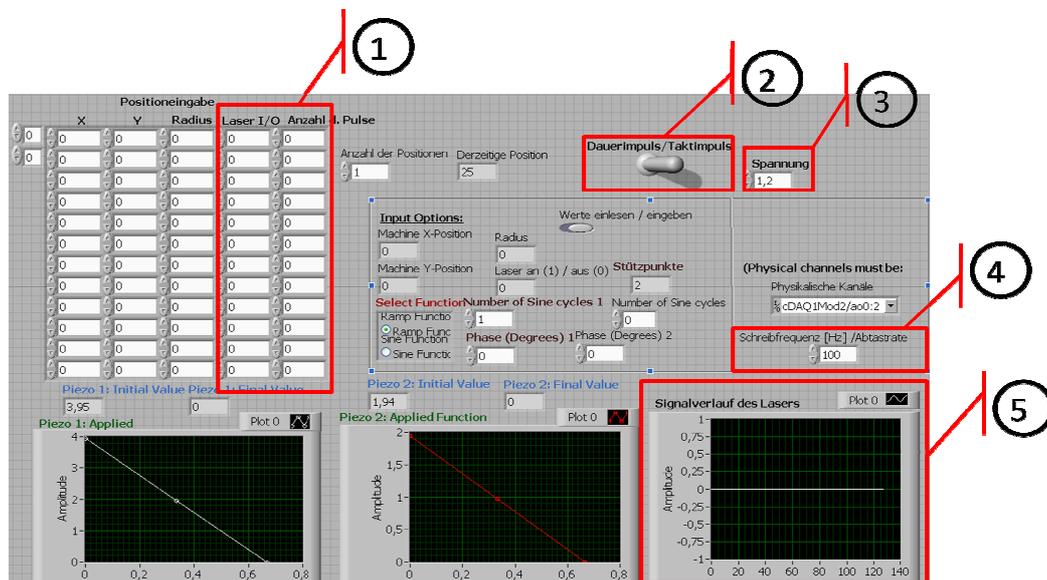


Abbildung 3.23: Frontpanel der VE- und Lasersteuerung

Im Eingabefeld „Laser I/O“ (1) kann der Bearbeitungslaser an- oder ausgeschaltet werden. Bei De- bzw. Aktivierung des Lasers muss die Ziffer 0 bzw. 1 ins Eingabefeld hineingegeben werden. Zusätzlich zur De- oder Aktivierung des Lasers wird die Menge von Pulsen in die Felder der Spalte „Anzahl der Pulse“ (1)

eingegeben. Somit können, beim Taktbetrieb, die Laserpunkte bei gespeicherten Koordinaten X, Y oder Radius gesetzt werden. Um zwischen den Möglichkeiten, Dauer- oder Taktimpuls, wählen zu können ist der Schalter (2) entsprechend zu positionieren. Zur Regelung der Spannung wird im Feld (3) der Spannungswert bzw. die Amplitude für den Funktionsgenerator im Modus „Laserstrahlung“ eingegeben. Dabei ist der Spannungswert auf 5 Volt beschränkt, um evtl. Schäden am Bearbeitungslaser zu vermeiden. Die De- oder Aktivierung, sowie das hin und her Schalten der Amplitude, des Bearbeitungslasers wird grafisch im Anzeigefeld (5) dargestellt und kann dort überprüft werden. Die Schreibfrequenz, in der die Spannungswerte auf die Ausgangskanäle geschrieben werden sollen, kann über das Bedienfeld (4) eingestellt werden.

4 Versuch

Dieses Kapitel befasst sich mit der Beschreibung des Versuchsaufbaus, der Versuchsdurchführung und der Beschreibung der Versuchsergebnisse zur Erprobung der einheitlichen Steuerung von Vorschubeinheit und Bearbeitungslaser. Im Versuchsaufbau wird zunächst der Versuchsstand mit den dazugehörigen Komponenten beschrieben. Darauf aufbauend werden in der Versuchsdurchführung und deren Auswertung, die Versuchsreihe zur Ermittlung der Einflüsse von unterschiedlichen Parametern auf das Bearbeitungsergebnis untersucht und beurteilt. Die Auswertung der Versuchsreihen wird mittels eines Mikroskops und einer Bildverarbeitungssoftware zur Vermessung von Geometrieelementen im Mikrobereich durchgeführt.

Die Versuchsdurchführung und deren Auswertung gliedert sich in vier Themengebiete, die mathematische Abschätzung der Laserenergie, die Bestimmung der optimalen Einstellparameter des Bearbeitungslasers in Kombination mit der VE, die Bestimmung der maximalen Anzahl der Laserpunkte pro Längeneinheit und die Erprobungen des Bearbeitungslasers im Dauer- und Taktbetrieb. Dabei wird nicht nur die Durchführung dargelegt, sondern es werden auch die Ziele beschrieben.

Die durchzuführenden Versuche sollen die Funktionalität und Zuverlässigkeit der implementierten Lasersteuerung zeigen. Um eine Auswertung der folgenden Versuchsreihen zu ermöglichen, müssen zunächst die Parameter identifiziert werden, die möglichst kleinen Laserpunkte mit geringer Wärmeeinflusszone (WEZ) auf dem Probewerkstück erzeugen. Diese Laserpunkte werden zunächst zu Linien und dann zu komplexeren geometrischen Figuren erweitert.

4.1 Prinzipieller Versuchsaufbau

In diesem Abschnitt wird der Versuchsstand am LaFT mit den dazugehörigen Komponenten beschrieben. Eine Gesamtübersicht zeigt die Abbildung 4.1. Die Aufgabe und Funktion der einzelnen Komponenten werden in den folgenden Unterkapiteln erläutert.

Ausgehend der Soll-Planung aus dem Kapitel 3.1 (siehe Abbildung 3.2) wird als Steuerungseinheit der Laptop mit der in dem Programm LabVIEW implementierten

Steuerungsapplikation verwendet. Sobald die errechneten Spannungswerte aus dem Steuerungsprogramm in dem A/D-Wandler empfangen werden, sendet dieser die Signale an den Controller für die Piezoaktoren und an den Festkörperlaser. An dieser Stelle wird gemäß den Signalen eine Laserstrahlung erzeugt. Die WST Handhabung außerhalb der Bearbeitungsexperimente erfolgt durch einen Koordinatentisch [ISE97].

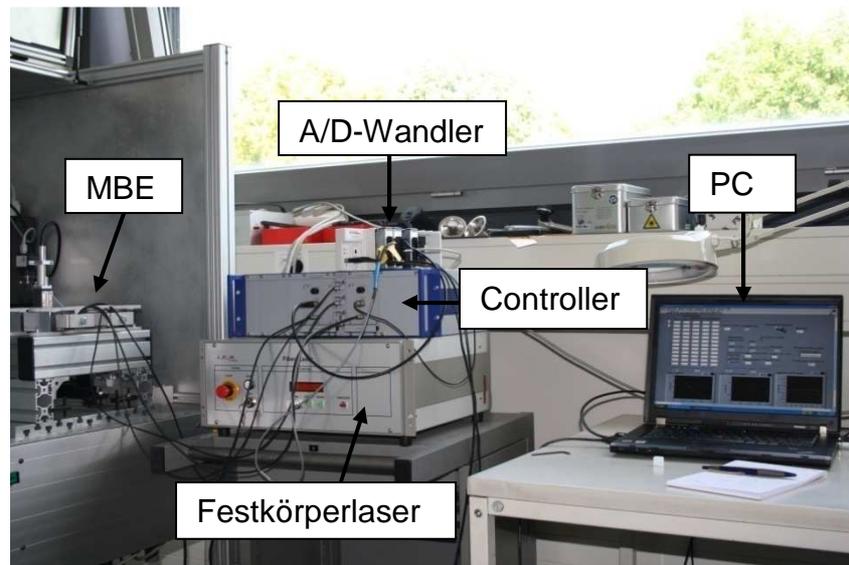


Abbildung 4.1: Prinzipieller Versuchsaufbau

In den folgenden Unterkapiteln werden die in Abbildung 4.1 dargestellten Komponenten des Versuchstandes näher erläutert.

4.1.1 National Instruments

Die Firma National Instruments hat sich auf die hard- und softwareseitige Lösung von Mess- und Steuerungsproblemen spezialisiert [NAT10]. Im Rahmen dieser Arbeit wird der A/D-Wandler sowie die dazugehörigen Karten, die zur Anwendung der VE- und Lasersteuerung benötigt werden, vom Hersteller National Instruments kurz vorgestellt. Weitere Erklärungen zu Features und Einzelheiten zu technischen Daten sind aus den Datenblättern bzw. den Benutzerhandbüchern zu entnehmen [NAT07; NAT10; NAT10a; NAT10b].

NI-compactDAQ-Chassis mit den dazugehörigen Modulen

Für die Datenerfassung (Data Acquisition, DAQ) wird ein Chassis vom Typ cDAQ-9172 in Kombination mit jeweils einem Modul des Typs 9263 und 9215 verwendet und verfügt über acht Steckplätze (siehe Abbildung 4.2) [NAT07]. Das Modul NI 9263 ist ein Analogausgangsmodul mit vier Kanälen und besitzt eine Abtastrate von 100 kS/s (kiloSample/second). Des Weiteren kann dieses Modul eine Spannung von ± 10 Volt beaufschlagen [NAT10a]. Das Analogeingangsmodul NI 9215, auch als Messkarte bezeichnet, kann Spannungen von ± 10 Volt aufnehmen. Weiterhin besitzt dieses Modul vier Kanäle und eine Abtastrate von 100 kS/s [NAT10b]. Um Schäden an den Modulen zu vermeiden sind beide gegen Kurzschlüsse und Überbelastungen von ± 30 Volt abgesichert [NAT10a; NAT10b].



Abbildung 4.2: NI-cDAQ-9172 Chassis von National Instruments

Mit Hilfe des von National Instruments mitgelieferten Programms Measurement Automation Explorer lassen sich die gewünschten Größen der Spannung skalieren. Mit dem Measurement Automation Explorer können verschiedene Hardwarekomponenten, wie Datenerfassungs- oder Motorensteuerungshardware, unter einer einheitlichen Oberfläche zusammengefasst werden. Dieses Tool erleichtert die spätere Programmierung mit LabVIEW, da sowohl die komplette Konfiguration der verwendeten Analogein- und ausgänge als auch die dafür benötigte Skalierung der einzelnen Größen übernommen wird.

4.1.2 Festkörperlaser

Als weitere Hardwarekomponente des Versuchsaufbaus wird am LaFT einen sog. Ytterbium Faser Laser (YFL) der Firma IPG Laser GmbH eingesetzt [IPG06].

Der verwendete Festkörperlaser für die Versuchsdurchführung (siehe Abbildung 4.3) besitzt eine Wellenlänge von 1030 nm, eine Spotgröße von weniger als 10 μm und eine Linienbreite von kleiner als 3 nm. Die abgegebene Leistung kann bis zu 105 Watt betragen [IPG06].



Abbildung 4.3: Ytterbium Faser Laser der Firma IPG Laser GmbH

Zur Einstellung des benötigten Laserstrahls wird am Fiber Laser der Firma IPG Laser GmbH nur der Modus „Extern“ (siehe Abbildung 4.3 – rechts „EXT“) ausgewählt. Somit ist gewährleistet, dass sämtliche Konfigurationen und Einstellungen des Festkörperlasers ausschließlich im Steuerungsprogramm LabVIEW vollzogen werden. Zur Realisierung dieser Einstellung werden die Ausgangssignale des Moduls NI 9263 elektrisch direkt in den Fiber Laser eingespeist (siehe Abbildung 4.4).



Abbildung 4.4: Verkabelung zwischen NI Modul 9263 und Festkörperlaser

Zur Aktivierung des FKLs muss der Button „Emission“ betätigt werden (siehe Abbildung 4.3). Dadurch wird ein Laserstrahl an der Fokussieroptik emittiert, die auf der WZ-Aufnahme der VE befestigt ist.

4.1.3 Vorschubeinheit

Die Vorschubeinheit besteht wesentlich aus drei Komponenten, den Piezoaktoren, dem Vorschubrahmen und der WZ-Aufnahme (siehe Abbildung 4.6). Die Fokussieroptik soll entlang der programmierbaren Bahnen geführt werden. Dazu werden in der Steuerungssoftware Positionen eingegeben (siehe Abbildung 3.8), die daraus die Soll-Spannungswerte für die Piezoaktoren berechnet. Anschließend werden die Spannungswerte über den Controller E-500 der Firma Physik Instrumente GmbH & Co. KG an die Piezoaktoren weitergeleitet (siehe Abbildung 4.5). Weitere Erklärungen zum Aufbau und Funktion der Vorschubeinheit sind aus dem Kapitel 2.1.3 „Vorschubeinheit“ zu entnehmen.



Abbildung 4.5: Piezocontroller der Firma Physik Instrumente

Im Versuchsstand ist die VE auf einem Aluminium Sockel mit Schrauben befestigt, um einen Abstand, auf Grund der Brennweite des Brennpunkts bzw. der Fokussieroptik, anzupassen. Zur Halterung, sowie der Zu- und Abfuhr des Werkstückes, wird am Versuchsstand ein Koordinatentisch der Firma isel automation GmbH & Co. KG eingesetzt [ISE97].

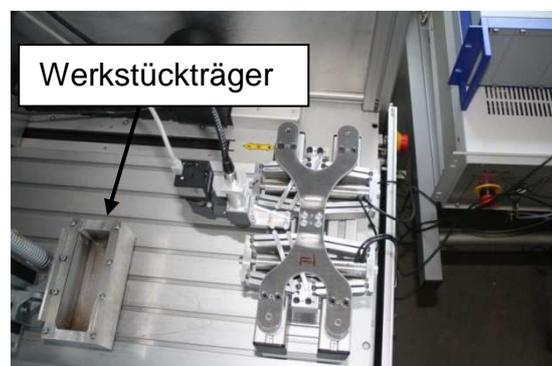


Abbildung 4.6: Mikrobearbeitungseinheit mit Laseroptik und Werkstückträger

Mit dem Koordinatentisch kann das Werkstück in konstanten Entfernungen zur Fokussieroptik, und damit im Fokus der Laserstrahlung positioniert werden. Des Weiteren bietet die Verfahrensmöglichkeit in X und Y Richtung das Durchführen von mehreren Bearbeitungsoperationen auf einem Werkstück ohne Werkstückwechsel.

4.2 Versuchsdurchführung und -auswertung

Um die Funktionalität und Zuverlässigkeit der entwickelten Steuerung für den Ytterbium Faser Laser der Firma IPG Laser GmbH zu beurteilen, wird im Voraus eine Überschlagsrechnung zur Ermittlung der Energiedichte im Fokus durchgeführt. Darauf aufbauend werden die optimalen Einstellparameter ohne und mit der Vorschubeinheit zur Bestimmung eines Laserpunktes experimentell analysiert und beurteilt. Für die Ermittlung werden die Arbeiten von [NEP09; RAN10] als Basis verwendet. Weiterhin wird die maximale Anzahl der Laserpunkte bei einer vorgegebenen Strecke ermittelt. Kriterien hierbei sind, die Erkennbarkeit des einzelnen Laserpunktes und ein möglichst geringe Breite der Linie.

Im letzten Schritt der Versuchsdurchführung und deren Auswertung werden die Werkstücke mit den ermittelten Einstellparametern im Dauer- oder Taktimpuls bearbeitet. Dafür sollen unterschiedliche Konturelemente erzeugt werden, um eine Beurteilung der Funktionalität und Zuverlässigkeit der einheitlichen Steuerung zu ermöglichen. Anhand eines Mikroskops und Bildverarbeitungssoftware werden die Oberflächenstrukturen auf Anzahl und Größe der Laserpunkte bzw. Linien und die Größe der Wärmeeinflusszone um den Laserpunkt überprüft.

4.2.1 Vordimensionierung

In diesem Abschnitt wird eine Überschlagsrechnung zur Ermittlung der Energiedichte im Fokus des Laserstrahls nach Grundlage von [HER10] für beide Betriebsarten durchgeführt. Für die weitere Versuchsdurchführung dient die Überschlagsrechnung als Basis bzw. als Unterstützung zur Bestimmung und Beurteilung des optimalen Laserpunktes. Im Rahmen der Arbeit wird auf die Herleitung zur Ermittlung der Energiedichte im Fokus verzichtet.

Kontinuierlich strahlender Ytterbium Faser Laser (Dauerimpuls)

Im ersten Schritt wird der Fokusbereich des Bearbeitungslasers bestimmt:

$$d = f * \Theta \quad (4.1)$$

Die Gleichung (4.1) ergibt sich aus der Brennweite der Linse f und aus dem vollen Divergenzwinkel in Bogenmaß Θ .

Mittels des Fokusbereichs wird die Fokusbereich berechnet:

$$A = \frac{\pi * d^2}{4} [m^2] \quad (4.2)$$

Aus dem Quotient der Laserleistung und der Frequenz ergibt sich die Energie-Gleichung (4.3):

$$E_{konti} = P * t = \frac{P}{f_{konti}} [J] \quad (4.3)$$

Aus der Gleichung (4.3) und (4.2) ergibt sich die Energiedichte im Fokus:

$$F = \frac{E_{konti}}{A} \left[\frac{J}{m^2} \right] \quad (4.4)$$

Gepulster Ytterbium Faser Laser (Taktimpuls)

Äquivalent zur Berechnung der kontinuierlichen strahlender YFL werden auch beim gepulsten Ytterbium Faser Laser dieselben Gleichungen verwendet. Allerdings wird zur Bestimmung der Energie-Gleichung (4.5) die Pulsfrequenz verwendet.

$$E_{puls} = P * t = \frac{P}{f_{puls}} [J] \quad (4.5)$$

In der Versuchsdurchführung kann die Schreibfrequenz aus der Gleichung (4.3) mit der Pulsfrequenz aus der Gleichung (4.5) gleichgesetzt werden, da die Taktung des FKLs über die A/D-Wandler-Karte (Modul NI 9263) von der einheitlichen Steuerung reguliert wird. Demzufolge kann eine Berechnung für beide Betriebsarten in einer Tabelle durchgeführt werden.

Berechnung

Zunächst wird die Fokusfläche berechnet, die während der Oberflächenbearbeitung stets konstant bleibt. Die eingesetzten Parameter stammen entweder aus dem Handbuch von [IPG06] oder aus den Arbeiten von [PRE09; RAN10].

Brennweite: $f = 93,5 \text{ mm}$

Voller Divergenzwinkel: $\Theta = 0,27 \text{ mrad}$

Aus den Gleichungen (4.1) und (4.2) wird die Fokusfläche errechnet:

$$A = \frac{\pi * d^2}{4} = \frac{\pi * (f * \Theta)^2}{4} = \frac{\pi * (93,5 \text{ mm} * 0,27 \text{ mrad})^2}{4} = 500,54 \text{ } \mu\text{m}^2$$

Die errechnete Fokusfläche wird in die Gleichung (4.4) zur Ermittlung der Energiedichte im Fokus (Einheit $\frac{W}{m^2}$) eingesetzt (siehe Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1: Energiedichte im Fokus des Ytterbium Faser Lasers

Frequenz [Hz] \ Leistung [W]	100	200	500	1000
1	1,9978E-05	1,99567E-10	2,65226E-26	2,79146E-54
1,5	2,9968E-05	2,99351E-10	3,97839E-26	4,18718E-54
2	3,9957E-05	3,99134E-10	5,30451E-26	5,58291E-54
2,5	4,9946E-05	4,98918E-10	6,63064E-26	6,97864E-54
3	5,9935E-05	5,98701E-10	7,95677E-26	8,37437E-54
3,5	6,9924E-05	6,98485E-10	9,2829E-26	9,77009E-54

Aus der Tabelle 4.1 ist zu beobachten, dass die errechneten Energiedichten im Fokus bei steigender Laserleistung und gleichbleibender Schreibfrequenz linear ansteigen. Weiterhin kann bei erhöhter Schreibfrequenz eine Reduzierung der Energiedichte im Fokus erreicht werden.

Mit der Erkenntnis aus der Tabelle 4.1 wird im Folgenden Kapitel die Bestimmung der optimalen Einstellparameter für zunächst einen Laserpunkt experimentell ermittelt.

4.2.2 Optimale Einstellparameter – Laserpunkt

Im Vorfeld der weiteren Versuchsdurchführung müssen die Parameter bestimmt werden, mit denen ein Laserpunkt erzeugt werden kann, der einen geringen Durchmesser bei verringerter WEZ besitzt. Um die Effektivität der Versuchsreihe zu erhöhen, wird als Werkstück ein Metallblech verwendet, auf dem sich nacheinander in verschiedenen Positionen mittels des Werkstückträgers (siehe Abbildung 4.7) mehrere Versuche durchführen lassen [RAN10]. Das Metallblech ist mit den Maßen 180 mm x 61 mm x 0,35 mm im Werkstückträger eingeführt und mit acht Schrauben befestigt (siehe Abbildung 4.7).



Abbildung 4.7: Werkstückträger mit Metallblech

Anschließend wird mittels des Werkstückträgers mit dem dazugehörigen Metallblech im Fokuspunkt des Lasers mit einem Abstand von 93,5 mm positioniert, welches der Brennweite entspricht [RAN10]. Als nächstes wird mit Hilfe der Tabelle 4.1 und den Einstellungen aus den Arbeiten [NEP09; RAN10] eine Reihe von Laserpunkten nebeneinander gesetzt. Dafür werden in der Bedienoberfläche (siehe Abbildung 3.23) die Eingangsparameter Spannung und Schreibfrequenz variiert. Die zur Ermittlung des optimalen Laserpunktes gewählten Einstellungen werden im Anhang (siehe Kapitel 7.1) tabellarisch dargestellt. Allerdings ist zu erwähnen, dass in dieser Versuchsdurchführung nur die Lasersteuerung aktiviert wird, d.h. die Positionseingabe der VE bzw. der Einsatz der Piezoaktoren wird zunächst deaktiviert, um die Funktionalität und Zuverlässigkeit ausschließlich der Lasersteuerung zu überprüfen.

In der ersten Versuchsreihe (siehe Anhang Kapitel 7.1) wurde zunächst der Parameter Spannung mit einer Schrittweite von 0,1 Volt (1–5 Volt) bei

gleichbleibender Schreibfrequenz von 100 Hertz ermittelt. Das optimale Resultat dieser Versuchsreihe ist ein Spannungswert von 1,2 Volt.

In der Abbildung 4.8 werden die Laserpunkte bei gleichbleibender Spannung von 1,2 Volt und steigender Schreibfrequenz von 100, 200, 500 und 1000 Hertz dargestellt. Aufgrund des verwendeten NI Modul 9263 der Firma NI liegt die Höchstgrenze der Schreibfrequenz bei 1000 Hz [NAT10a]. Die Abmessungen der Laserpunktdurchmesser sowie das daraus resultierende WEZ-Maß sind in Tabelle 4.2 aufgelistet.

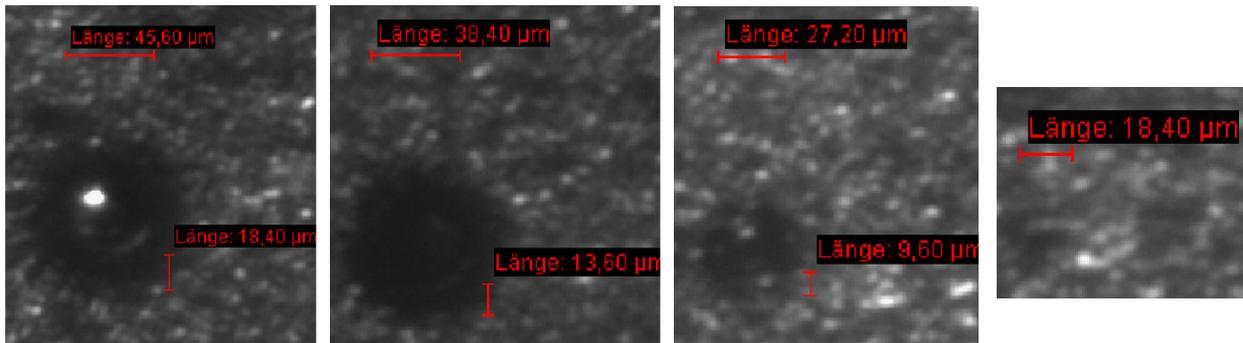


Abbildung 4.8: Erzeugte Laserpunkte bei 40-facher Vergrößerung

Tabelle 4.2: Messung der Laserpunkte bei konstanter Spannung von 1,2 V

Schreibfrequenz [Hz] \ Maßtyp [μm]	100	200	500	1000
Durchmesser	45,60	38,40	27,20	18,40
WEZ	18,40	13,60	9,60	nicht Messbar

Bei Betrachtung der Tabelle 4.2 und der Abbildung 4.8 befinden sich aufgrund der Größe des Laserpunkts und der WEZ die optimalen Einstellparameter für einen Laserpunkt bei einer Spannung von 1,2 Volt und Schreibfrequenz von 1000 Hertz (s. Tabelle 4.2).

Nach der Ermittlung der optimalen Einstellparameter für einen Laserpunkt werden im Folgenden Kapitel die optimalen Einstellparameter in Verbindung mit der VE ermittelt.

4.2.3 Optimale Einstellparameter mit Vorschubeinheit

Im Kapitel 4.2.2 wurden die optimalen Einstellparameter ausschließlich für den Bearbeitungslasers ermittelt. Dabei beschränkte sich die Versuchsreihe auf die maximale Schreibfrequenz des Moduls NI 9263. Aufgrund dessen, dass die Piezoaktoren und der verwendete Festkörperlaser über denselben Analogausgangsmodul betrieben werden, erfolgt in diesem Abschnitt die Ermittlung der optimalen Einstellparameter des Bearbeitungslasers in Verbindung mit der Vorschubeinheit. Besonderes Augenmerk in dieser Versuchsdurchführung liegt dabei auf der Betrachtung der Reaktionszeit der Piezoaktoren, die durch die Trägheit des Gesamtsystems der VE beschränkt wird.

Um die Funktionalität und Zuverlässigkeit der einheitlichen Steuerung zu überprüfen, werden in dieser Versuchsreihe zunächst im Taktbetrieb gepunktete Linien (10 Laserpunkte) vom Nullpunkt des Bearbeitungsraums bis zur maximalen möglichen X-Position erzeugt.

Zunächst werden in der Positionseingabe des Steuerungsprogramms (siehe Abbildung 3.23) die anzufahrenden Positionen 1,9 mm in X-Richtung und 0 mm in Y-Richtung eingegeben. Weitere Eingabeparameter für die erste Versuchsreihe sind aus der Tabelle 4.3 zu entnehmen. Hierbei werden die ermittelten Einstellparameter aus dem Kapitel 4.2.2 berücksichtigt. Das resultierende Ergebnis wird in Abbildung 4.9a) präsentiert.

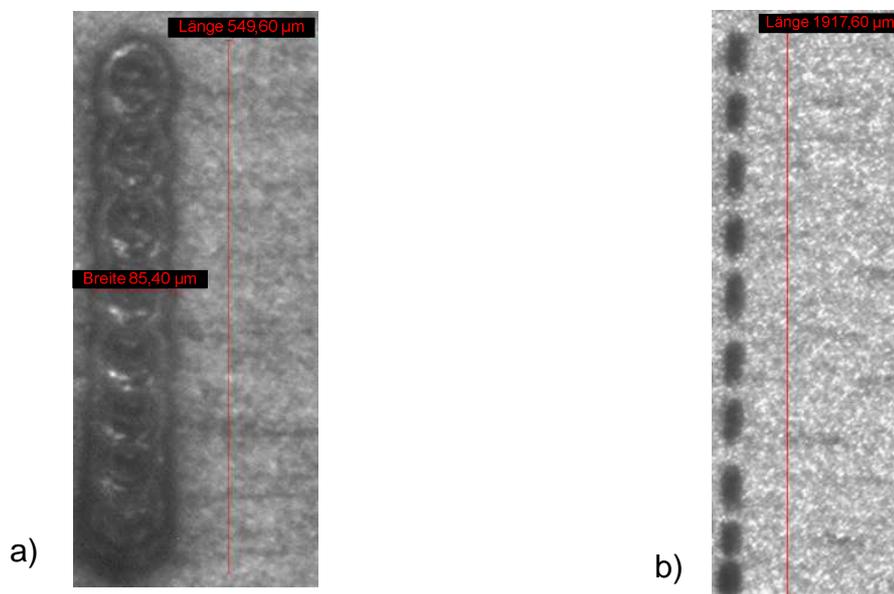
Tabelle 4.3: Eingangswerte für die erste Versuchsreihe

Spannung [V]	Schreibfrequenz [Hz]	Anzahl d. Pulse	Dauer- oder Taktimpuls	Laser I/O
1,2	1000	10	Taktimpuls	1 (Laser an)

Wie in der Abbildung 4.9a) zu erkennen ist, beträgt die Länge der gepunkteten Linie 549,60 μm , dies entspricht einer Differenz von 1350,40 μm in X-Richtung zur eingegebenen Solllänge von 1900 μm . Infolge der Trägheit des Gesamtsystems erfolgt die mechanische Aktivierung der Piezoaktoren zu einem späteren Zeitpunkt. Als Folge muss eine Versuchsreihe zur Ermittlung der optimalen Einstellparameter in Verbindung mit der Vorschubeinheit erstellt werden, um mögliche Differenzen

zwischen Ist- und Sollmaß zu vermeiden. Die Versuchsreihe wird im Anhang (siehe Kapitel 7.2) tabellarisch dargestellt.

Die Abbildung 4.9b) zeigt eine gepunktete Linie mit einer Länge von 1917,60 μm . Dies entspricht in etwa der Solllänge von 1900 μm . Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bei einer Messungsgenauigkeit von 2-3 Pixel, was einer Kantenlänge von ca. 2,8 μm entspricht, Abweichungen entstehen können. Für die Erstellung dieser gepunkteten Linie wurde die Schreibfrequenz von 1000 auf 100 Hz reduziert, um eine Anpassung zwischen der Trägheit des Gesamtsystems der VE und dem Bearbeitungslaser zu erzielen. Weitere Einstellungen für die Erstellung dieser gepunkteten Linie wie Spannung, Anzahl der Pulse etc. wurden aus der Tabelle 4.3 entnommen.



**Abbildung 4.9: gepunkteten Linie bei 25-facher Vergrößerung-10 LP-Länge 1,9mm
Schreibfrequenz a) 1000Hz b) 100 Hz**

In Abbildung 4.10 werden die Ergebnisse der Versuchsreihe im Dauerbetrieb dargestellt. Hierfür wurden die optimalen Einstellparameter aus der Versuchsreihe des Taktbetriebes verwendet. Die erzeugte Lasermarkierung weist eine Breite von 62 μm und eine Ist-Länge von 1962,30 μm auf (siehe Abbildung 4.10a). Um optimale Konturelemente ausschließlich für den Dauerbetrieb zu erzeugen, wird die Schreibfrequenz von 100 Hz auf 200 Hz erhöht. Zielführend für diese Erhöhung ist die Verminderung der Breite der erzeugten Lasermarkierung beim Dauerbetrieb. Das Resultat dieser Versuchsdurchführung wird sowohl in Abbildung 4.10b) auch in der Tabelle 4.4 dargestellt. Bei einer Schreibfrequenz von 200 Hz und einer Spannung von 1,2 V wird im Dauerbetrieb eine Breite von 46,50 μm erzeugt. Dieses Maß in

Abhängigkeit der Einstellparameter ist ausreichend für den Dauerbetrieb, da bei noch höherer Schreibfrequenz die Laserstrahlung nur noch ein anlaufen des Werkstoffes bewirkt und diese über kein ausreichenden Kontrast zur Vermessung mittels der Bildverarbeitungssoftware verfügt. Weiterhin ist zu erkennen, dass beide Strecken keine exakte Geradheit besitzen. Laut [RAN10] könnte die Abweichung auf Grund eines nicht korrekt kompensierten unterschiedlichen Ausdehnungsverhaltens der Piezoaktoren beruhen.

Tabelle 4.4: Messung beim Dauerbetrieb

Schreibfrequenz	100 Hz	200 Hz
Maß		
Pulsbreite [μm]	62	46,50

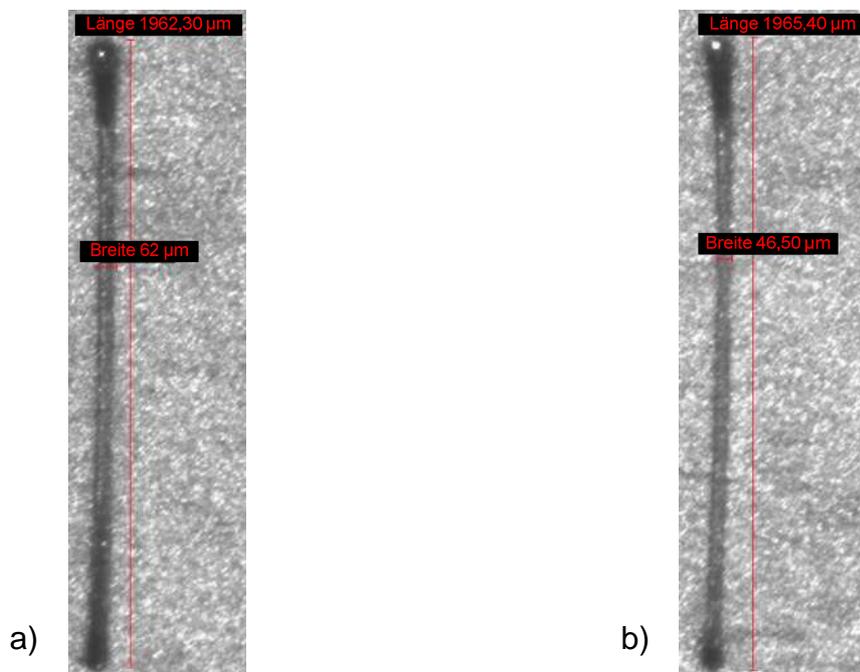


Abbildung 4.10: Linie im Dauerbetrieb bei 25-facher Vergrößerung Schreibfrequenz: a) 100 Hz – b) 200 Hz

4.2.4 Optimierung der Anzahl der Laserpunkt bei Linien

In diesem Abschnitt wird die optimale Anzahl der Laserpunkte bei einer vorgegebenen Strecke ausschließlich im Taktbetrieb ermittelt. Diese Strecken bzw. Linien werden aus einer Anzahl von Laserpunkten erzeugt, die zum einen eine geschlossene Linie aufweist und zum anderen eine möglichst schmale Linie besitzt.

Zielführend dieser Versuchsreihe ist die Bestimmung der Anzahl der Laserpunkte pro Längeneinheit, um eine Aussage zu treffen zu können, wie viele Laserpunkte bei einer vorgegebenen Strecke benötigt werden.

Hierfür soll die Anzahl der Laserpunkte soweit erhöht werden, dass sich für den Bearbeitungslaser, mit den bisher ermittelten Einstellparametern, ein optimales Ergebnis der Oberflächenbearbeitung ergibt. Um dies zu ermöglichen, wird die Anzahl der Laserpunkte mit einer Schrittweite von 5 Pulsen erhöht. Dabei ist zu beachten, dass die Wärmeeinflusszone innerhalb der vorgegebenen Strecke möglichst gering ausfallen muss. Als vorgegebene Strecke wird 1 mm in X-Richtung im Frontpanel eingegeben. Des Weiteren ergibt sich die Anzahl der Laserpunkte aus der Anzahl der zu schreibenden Werte im Modus „Schreiben“ (siehe Kapitel 3.4.5).

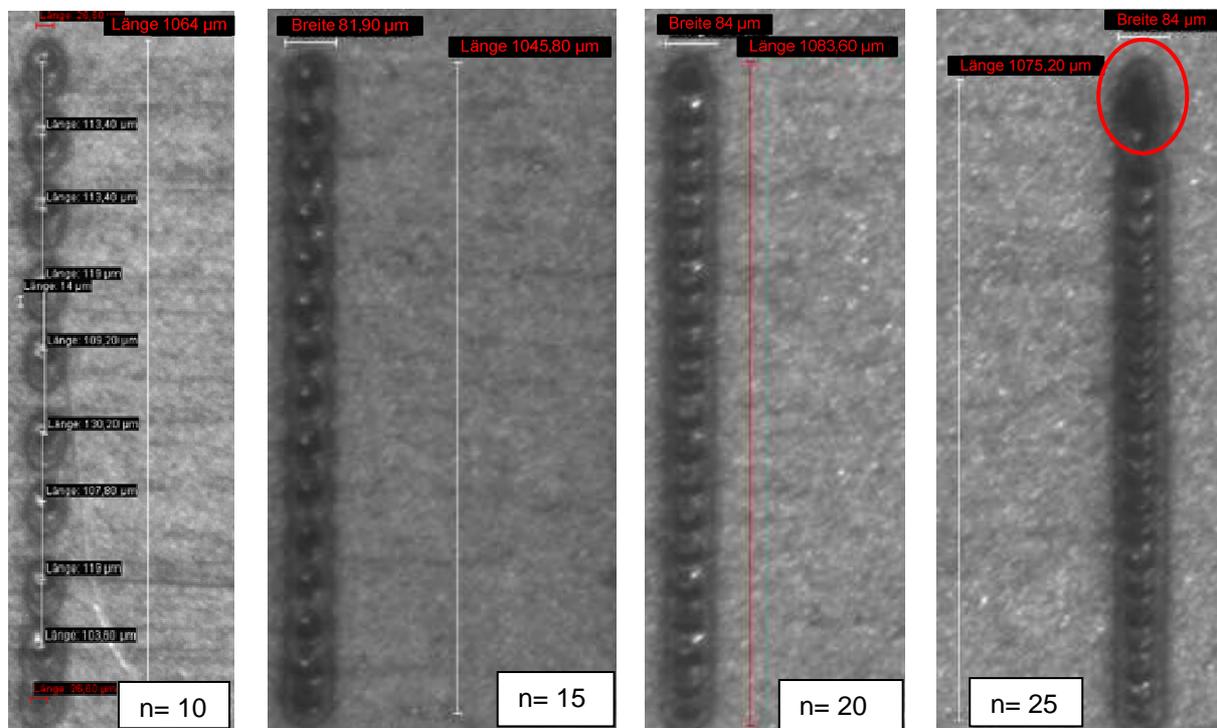


Abbildung 4.11: Erzeugung von gepunkteten Linien bei 25-facher Vergrößerung

Die Abbildung 4.11 stellt die Versuchsreihe mit einer quantitativen Messung, die in der Tabelle 4.5 repräsentiert wird, dar. Dabei ist zu beobachten, dass in der Versuchsreihe mit 25 Laserpunkten die max. Position der Strecke eine Vergrößerung der WEZ aufweist (siehe Abbildung 4.11 – n= 25). Die größere WEZ, entsteht auf Grund eines ineinander Fließens der Laserpunkte. Auslöser hierfür ist das hintereinander Setzen der Laserpunkte bzw. das Hinzufügen der Laserenergie.

Dadurch steigt kontinuierlich die Temperatur des WSTs, da während der Oberflächenbearbeitung keine vollständige Abkühlung stattfindet. Das Resultat bei einer erhöhten Anzahl der Laserpunkte ist ein frühzeitiges Schmelzen am Werkstück (siehe Abbildung 4.11 – n= 25). Das Bearbeitungsergebnis bei 20 Laserpunkten auf einer Strecke von 1 mm zeigt eine gleichmäßige Verteilung der Laserpunkte.

Tabelle 4.5: Messung der gepunkteten Linien

Pulsanzahl Maße	10	15	20	25
Länge [μm]	1064,00	1045,80	1083,60	1075,20
Breite [μm]	81,90	81,90	84,00	84,00

4.2.5 Erprobung im Dauer- und Taktbetrieb

Um die Funktion der gemeinsamen Steuerung zu untersuchen und zu beurteilen, werden verschiedene geometrische Figuren, unter Nutzung beider Betriebsarten des Lasers, erzeugt. Als geometrische Figuren werden in dieser Versuchsdurchführung Rauten und Rechtecke verwendet.

Zur Beurteilung der Fähigkeit und Zuverlässigkeit der entwickelten Lasersteuerung werden die erzeugten Figuren in 3 Kategorien unterteilt. Zu der ersten gehören Figuren und Geometrien die in einem Durchlauf gefertigt werden. Die zweite Kategorie bilden Figuren, in denen der Bearbeitungslaser zwischenzeitlich an- und ausgeschaltet wird. In der letzten Kategorie werden zusammengesetzte Geometrien wie z.B. ein Rechteck in einer Raute erzeugt. Alle erzeugten Figuren wurden unter dem Mikroskop bei 10-facher Vergrößerung vermessen.

Kategorie 1

Wie in der Abbildung 4.12 zu erkennen ist, wurde eine Bearbeitungsoperation entlang der Hohlkurve des Arbeitsraums im Taktbetrieb (a) und Dauerbetrieb (b) durchgeführt. Die in Abbildung 4.12a) gezeigte Struktur wurde im Uhrzeigersinn hergestellt. Auf dem ersten Teilstück der Hohlkurve sind einzelne Laserpunkte zu erkennen. Somit werden die Versuchsergebnisse aus der Versuchsreihe „Optimierung der Anzahl der Laserpunkte bei Linien“ im Kapitel 4.2.4 bestätigt. Im weiteren Verlauf wird durch die Gesamtenergie das Werkstück soweit erwärmt, dass die Laserpunkte mittels der optischen Auswertungsverfahren nicht unterschieden werden. Als eine Lösungsmöglichkeit dieser thermischen Beanspruchung kann eine

kurzzeitige Abkühlung zwischen den Strecken angeboten werden. Die erzeugte Hohlkurve in Abbildung 4.12b) weist im Gegensatz zur Raute beim Taktbetrieb eine Differenz von $+22,73 \mu\text{m}$.

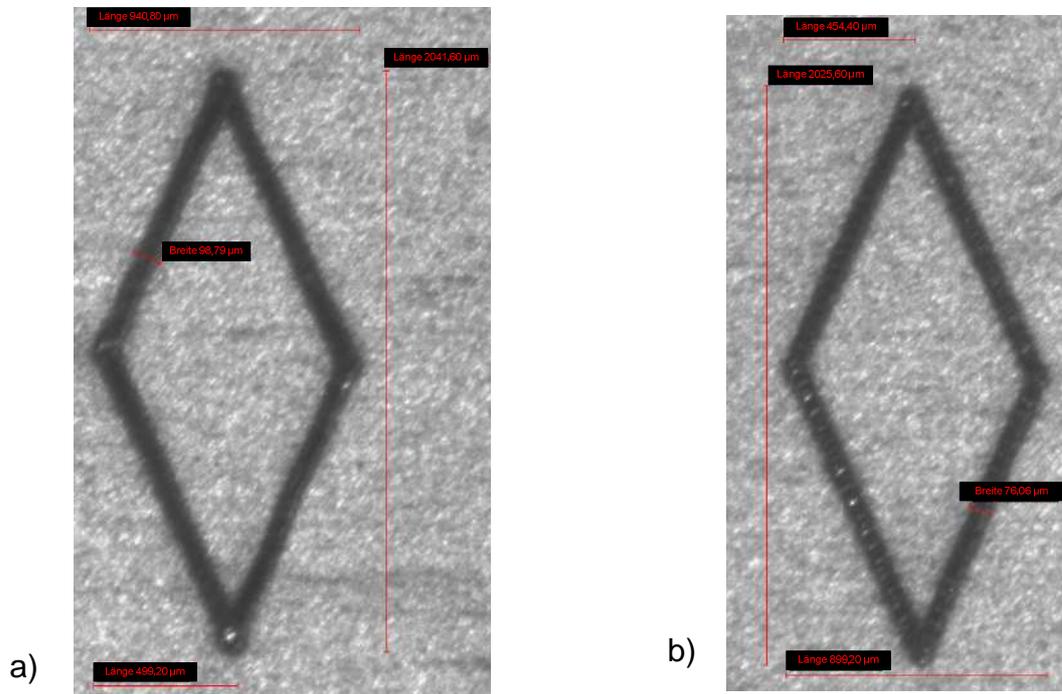


Abbildung 4.12: Raute bzw. Arbeitsraum im a) Taktbetrieb und b) Dauerbetrieb

Kategorie 2

In der zweiten Kategorie dieser Versuchsdurchführung sollen die Fähigkeiten der Funktionen „Laser an/aus“ und „Anzahl der Pulse“ für beiden Betriebsarten untersucht werden. Dafür werden die Exemplare „Halbe Pfeile“ und „Pfeil“ in der Abbildung 4.13 präsentiert. Basierend auf die Verfahrbewegung des max. Arbeitsraums sind zwei Streckenabschnitte mittels der Funktion „Laser an/aus“ nicht bearbeitet wurden (siehe Abbildung 4.13b) und c)). Somit kann die implementierte Lasersteuerung in Abhängigkeit bei definierten Konturelementen kurzzeitig an und ausgeschaltet werden. Des Weiteren sind in der Abbildung 4.13a) mittels der Funktion „Anzahl der Pulse“ eine unterschiedliche Anzahl von Laserpunkten erzeugt worden. Die senkrecht gepunktete Linie besitzt eine Anzahl von 20 Laserpunkten. Die Schenkel des Pfeils besitzen jeweils 10 Laserpunkte. Somit können Streckenabschnitte mit unterschiedlicher Anzahl von Laserpunkten erzeugt werden.

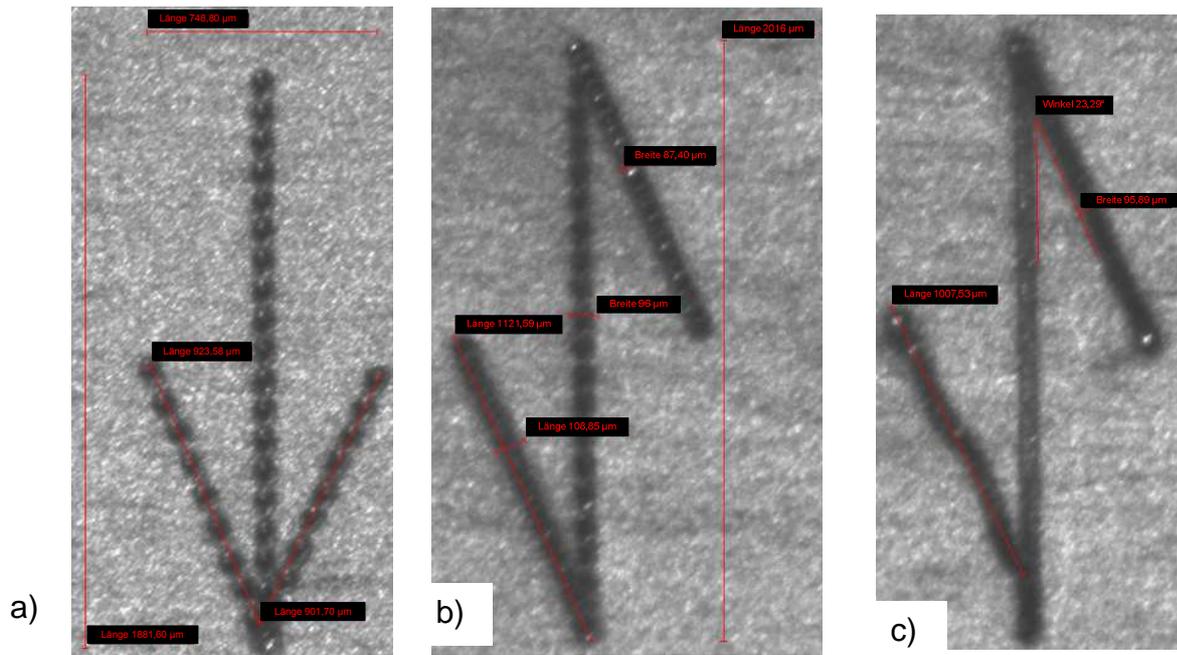


Abbildung 4.13: Pfeil und Halbe Pfeile in a) und b) Taktbetrieb und c) Dauerbetrieb

Kategorie 3

In der letzten Kategorie werden zwei geometrischen Figuren (Quadrat und Raute) zusammengeführt (siehe Abbildung 4.14). Zur Erzeugung dieses Exemplars wurde zunächst die Raute in einem Durchlauf gefertigt. Im Taktbetrieb wurde jede Strecke mit 20 Laserpunkten gefertigt (siehe Abbildung 4.14a)). Anschließend folgt eine Unterbrechung des BearbeitungsLasers, um eine Positionierung des Quadrats anzusteuern. Dadurch soll eine Überlappung der WEZ vermieden werden. Anschließend folgt die Fertigung des Quadrats in der Raute. Dennoch ist die gegenseitige thermische Beeinflussung besonders in Abbildung 4.14b) zu erkennen. Die Schnittpunkte beider Verfahrenswege der geometrischen Figuren verdeutlichen eine hohe Konzentration der WEZ. Des Weiteren zeigen Streckenelemente im Dauerbetrieb eine Ungeradheit auf, was auf dem nicht korrekt kompensierten und unterschiedlichen Ausdehnungsverhalten der Piezoaktoren beruht [RAN10].

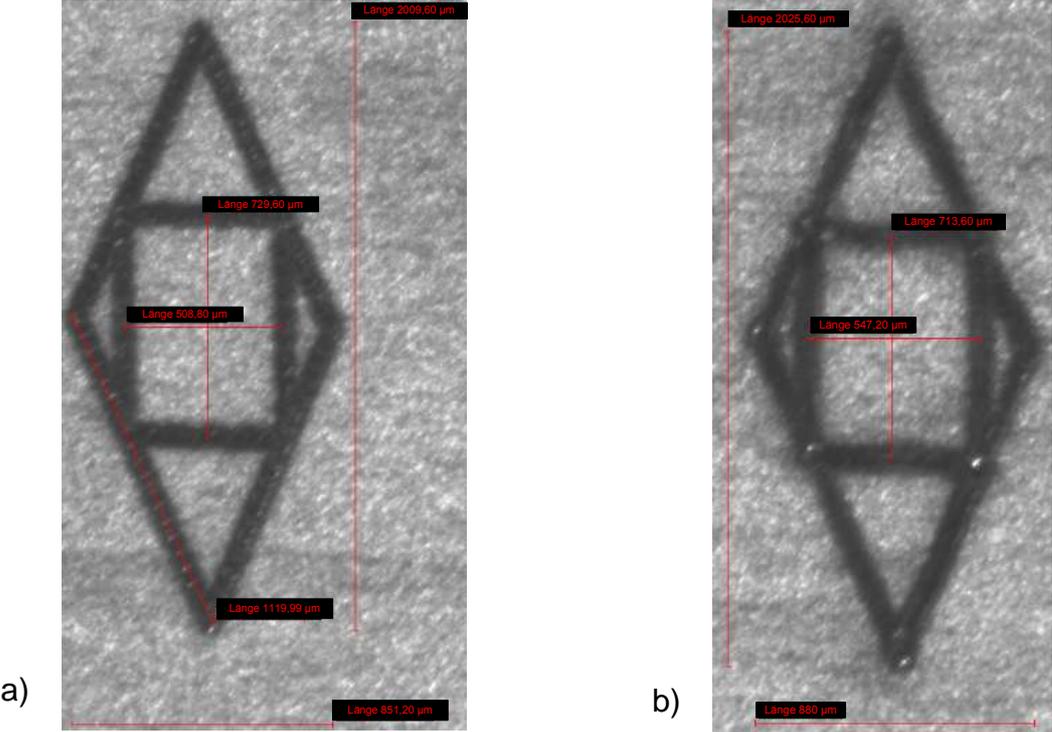


Abbildung 4.14: Quadrat in Raute a) Taktbetrieb b) Dauerbetrieb

5 Zusammenfassung

Ausgangspunkt für diese Arbeit, ist die Problematik die aufgrund der zeitlichen Asynchronität zwischen der VE und Lasersteuerung zustande kommt, welche Ungenauigkeiten und Zeitversatz zur Folge haben, und das gewünschte Ergebnis der Oberflächenbearbeitung negativ beeinträchtigen.

Das Ergebnis dieser Arbeit erbrachte eine einheitliche und synchrone Steuerung der VE und des Bearbeitungslasers. Basis für die Vereinheitlichung war die Bewältigung der Aufgabe die Pumplichtquelle des Festkörperlaser zu modulieren und damit die Funktion des Taktimpulses zu realisieren. Des Weiteren wurde die Steuerung im Funktionsumfang erweitert.

Besonders positiv an dieser Arbeit ist hervorzuheben, dass anhand der Versuchsreihe die Möglichkeit belegt werden konnte, komplexe Geometrien in einem Arbeitsgang zu erstellen. Weiterhin ist eine Verkürzung der Bearbeitungszeit zu erwarten.

Künftige Versuchsreihen sollten sich mit der Möglichkeit beschäftigen, die Einstellung der Schreibfrequenzen separat zu bestimmen, mit dem Ergebnis, dass Piezoaktoren und Bearbeitungslaser unabhängig voneinander reguliert werden können. Zudem sollten anhand einer eigenen Forschungsreihe die Faktoren identifiziert werden, die die windschiefen Verzerrungen bei geometrischen Figuren erzeugen bzw. auslösen.

6 Quellenverzeichnis

6.1 Literaturverzeichnis

- [ARZ90] Arzdorf, K.:
- Entwicklung von Anwendungssystemen**, Würzburg, Vogel-Fachbuch, 1. Auflage (1990), [S. 224-231]
- [BOH77] Bohl, M.:
- Flussdiagramme – Einstieg in die EDV**, Stuttgart, Springer Verlag 2. Auflage (1977)
- [BRU07] Brudek, G.:
- Beiträge zur Prozessanalyse in der Mikrozerspannung – Insbesondere für das Mikrofräsen**, Dissertation an der Helmut Schmidt Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg (2007), [S.1]
- [DIN66001] Norm:
- DIN 66001: **Informationsverarbeitung; Sinnbilder und ihre Anwendung**. DIN 66001:1983-12, Beuth Berlin Wien Zürich, 1983
- [DIN 66262] Norm:
- DIN 66261: **Informationsverarbeitung; Sinnbilder für Struktogramme nach Nassi-Shneidermann**. DIN 66261:1985-11, Beuth Berlin Wien Zürich, 1985
- [GEO07] Georgi, W.; Metin, E.:
- Einführung in LabVIEW**, Leipzig, Carl Hanser Verlag 3. Auflage (2007), [S.101-102]
- [HAR96] Hartmann, M.:
- DYNAPRO Erfolgreich produzieren in turbulenten Märkten**, Stuttgart, LOGIS Verlag, Band 1 (1996)

- [HÜG09] Hügel, H.; Graf, T.:
Laser in der Fertigung – Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren. Wiesbaden, Vieweg + Teubner Verlag, 2. Auflage (2009)
- [IPG06] N.N.:
IPG Laser GmbH: YLR-100-SM Ytterbium Fiber Laser – User’s Guide. Burbach, IPG Laser GmbH, (2006)
- [ISE97] N.N.:
isel-CNC-Flachbettanlage: Bedien- und Wartungsanleitung. Fa. Iselautomation, (1997)
- [JUN04] Jungnickel, U.:
Miniaturisierte Positioniersysteme mit mehreren Freiheitsgraden auf der Basis monolithischer Strukturen. Dissertation. Darmstadt: TU Darmstadt, 2004
- [KÄM09] Kämmerer, S.:
Multivariate Untersuchung und Parameteroptimierung einer Vorschubeinheit für das Square Foot Manufacturing, Bachelorarbeit am Laboratorium Fertigungstechnik der Helmut Schmidt Universität/ Universität der Bundeswehr, 2009 [S. 21]
- [KOH09] Kohrs, P., Wulfsberg, J.P.:
Square Foot Manufacturing – A Progress Report. In: Proceedings of the 9th international conference of the european society for precision engineering and nanotechnology euspen, Vol. II, p. 26-29, June 2-5, 2009, San Sebastian, Spain
- [KOH10] Kohrs, P; Hoffmann, S.; Wulfsberg, J. P:
Implementation of a flexure based feed unit for the Square Foot Manufacturing Concept. In: Proceedings of the euspen International Conference, Delft, June 2010

- [LEH08] Lehmann, J.:
Kombinierte multifunktionale Arbeitsräume zur Restrukturierung der Mikroproduktion, Dissertation an der Helmut Schmidt Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg (2008), [S. 6, 118-122]
- [MES04] Mescheder, U.:
Mikrosystemtechnik – Konzepte und Anwendungen, Stuttgart, Teubner Verlag, 2. Auflage (2004), [S. 1-2]
- [MÜT09] Mütterlein, B.:
Handbuch für Programmierung mit LabVIEW, Heidelberg, Springer Verlag, 1. Auflage (2009), [S.45-54]
- [NAU08] Naumann, T.:
Konzeptionelle Entwicklung und Konstruktion eines Vorschubantriebs für eine Mikrobearbeitungseinheit des Square Foot Manufacturing, Diplomarbeit am Laboratorium Fertigungstechnik der Helmut Schmidt Universität/ Universität der Bundeswehr, 2008
- [NEP09] Nepora, P. J.:
Praktische Erprobung der Laserbearbeitung mit einer Maschine nach dem Square Foot Manufacturing Konzept, Bachelorarbeit am Laboratorium Fertigungstechnik der Helmut Schmidt Universität/ Universität der Bundeswehr, 2009 [S.14]
- [PLA85] Platz, G.:
Methoden der Software-Entwicklung, München Wien, Carl Hanser Verlag 2. Auflage (1985), [S.98-99]
- [RAA92] Raasch, J.:
Systementwicklung mit Strukturierten Methoden, München Wien, Carl Hanser Verlag, 2. Auflage (1992), [S.96-99]
- [SCH90] Schönthaler, F.; Németh, T.:
Software-Entwicklungswerkzeuge: Methodische Grundlagen, Stuttgart, Teubner Verlag, (1990), [S.71]

- [STO93] Stork, H.G.:
Methoden der imperativen Programmierung, Stuttgart, Teubner Verlag (1993), [S.101-102; S, 307-309]
- [WAN06] Wang, Q.:
Piezoaktoren für Anwendungen im Kraftfahrzeug, Messtechnik und Modellierung, Dissertation an Ruhr Universität Bochum, (2006), [S. 11-12]
- [WEC06] Weck, M.; Brecher, C.:
Werkzeugmaschinen Konstruktion und Berechnung, Berlin Heidelberg, Springer Verlag, 8. Auflage, (2006)
- [WEL98] Wellenreuther, G.; Zastrow D.:
Steuerungstechnik mit SPS, Wiesbaden, Vieweg Verlag, 5. Auflage (1998), [S.319-324]
- [WUL08] Wulfsberg, J. P.; v. Scotti, F.; Kohrs, P.:
Square Foot Manufacturing – An Innovative Production Concept for Micromachining. In: Proceedings of 70 the euspen International Conference, Vol. 2, p. 540-544, Zürich, May 18-22, 2008.
- [WUL08a] Wulfsberg, J. P.; Redlich, T.; Lehmann, J.; Bruhns, F.-L.:
Square Foot Manufacturing - Ein wandlungsfähiges Produktionssystem für die Fertigung von Mikroteilen, In: wt Werkstatttechnik online, Jahrgang 98, Ausgabe 5-2008, S.337-344, reviewed Paper.
- [WUL08b] Wulfsberg, J. P.; Redlich, T.; Lehmann, J.; Bruhns, F.-L.:
Raum-Zeit-Systeme in der Fertigungsphysik Multifunktional genutzte Arbeitsräume am Beispiel des Square Foot Manufacturing, Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF 103 (2008) 9, ISSN: 0947-0085, S. 607 –612

[WUL09] Wulfsberg, J.P.:

Machine Tool Design for a Higher Changeability. Erschienen in 3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2009), 05.-07. October 2009, München, Carv 2009.

6.2 Internetquellen

[BAY10] N.N.:

Mechanische und thermische Eigenschaften: Werkstoffdaten: EN AW-2024 T3; EN AW-Al Cu4Mg1, Bayrisches Online-Materialinformationssystem,
<http://www.werkstoffe.de/Werkstoffe/werkDetails.do?werkid=210> (Abruf am 03. Juni 2010)

[BRU06] Bruns, R., Gravenkötter G.:

Größeneffekte in der Mikrologistik, Helmut Schmidt Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg (2006) , http://www.hsu-hh.de/download-1.4.1.php?brick_id=USwY0heEIKdH6n0f (Abruf am 17. Mai 2010)

[BUN10] N.N.:

Prozessmodelle - Flussdiagramme. In: Bundesministerium des Inneren (2010),
http://www.orghandbuch.de/OrganisationsHandbuch/DE/6_MethodenTechniken/62_Dokumentationstechniken/624_Prozessmodelle/b052_flussdiagramm_img.property=default.jpg (Abruf am 13.06.2010)

[COM10] N.N.:

Stichwort: Ablaufplan, Computerwissen Online, Fachwörterlexikon,
<http://www.computerwissen-online.de/?page=lexika&action=view&content=7> (Abruf am 07.06.2010)

- [GAB10] N.N.:
Stichwort: Struktogramm, Gabler Verlag (Herausgeber): Gabler
Wirtschaftslexikon,
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/76260/struktogramm-v6.html>
(Abruf am 30. April 2010)
- [GAB10a] N.N.:
Stichwort: Programmablaufplan; Gabler Verlag (Herausgeber):
Gabler
Wirtschaftslexikon,
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/76191/programmablaufplan-v6.html> (Abruf am 10. Mai 2010)
- [HAR05] Hartelt, M.; Klaffke, D.:
Verschleiß- und reibungsfreier Tribometrie-Schwingtisch für reversierende und oszillierende Bewegung, (2005), Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin, <http://www.patent-de.com/20050825/DE10252118B4.html> (Abruf am 16. Juni 2010)
- [HER10] Hering, P.; Schwarzmaier, H-J.:
Grundlagen der Lasertechnik, Vorlesungsskript, Institut für Lasermedizin Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, <http://www.uni-duesseldorf.de/WWW/MedFak/LaserMedizin/Laserkurs/skript/Kapitel1.PDF> (Abruf am 17. Juni 2010)
- [NAT07] National Instruments:
USER GUIDE AND SPECIFICATIONS NI cDAQ- 9172, (2007). USA, Texas, Austin. www.ni.com/pdf/manuals/371747c.pdf
(Abruf am 07. Juli 2010)
- [NAT10] National Instruments:
Unternehmensinformation (2010). USA, Texas, Austin.
<http://www.ni.com/company/d/>
(Abruf am 07. Juli 2010)
- [NAT10a] National Instruments:

C Series Analog Output Modules, (2010), URL:
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/14170> (07. Juli 2010)

[NAT10b] National Instruments:

C Series Analog Input Modules, (2010), URL:
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/14588> (07. Juli 2010)

[OTT04] N.N.:

Faszinierende Welt der Mikrosysteme, Otto Benecke Stiftung e.V
(2004), [http://www.obs-
ev.de/fileadmin/user_upload/pdf/Information_Mikrosystemtechnik.pdf](http://www.obs-ev.de/fileadmin/user_upload/pdf/Information_Mikrosystemtechnik.pdf)
(Abruf am 15. Mai 2010)

7 Anhang

7.1 Tabellarische Auflistung zur Ermittlung des Laserpunktes

Datum	LfdNr.	Versuchsname	U [V]	t [mm]	Schreibfrequenz [1/s]	Beurteilung
09.06.2010	1	1 Punkt generieren	1,2	0,3	100	Punkt durch. zu groß
09.06.2010	2	1 Punkt generieren	1,2	0,3	200	Punkt durch. zu groß
09.06.2010	3	1 Punkt generieren	1,2	0,3	300	Punktdurch. verringert sich
09.06.2010	4	1 Punkt generieren	1,2	0,3	400	Punktdurch. verringert sich
09.06.2010	5	1 Punkt generieren	1,2	0,3	500	Punktdurch. + WEZ verringert sich
09.06.2010	6	1 Punkt generieren	1,2	0,3	600	Punktdurch. + WEZ verringert sich
09.06.2010	7	1 Punkt generieren	1,2	0,3	700	Punktdurch. + WEZ verringert sich
09.06.2010	8	1 Punkt generieren	1,2	0,3	800	Punktdurch. Mit Auge nicht mehr zu erkennen
09.06.2010	9	1 Punkt generieren	1,2	0,3	900	Punktdurch. Mit Auge nicht mehr zu erkennen
09.06.2010	10	1 Punkt generieren	1,2	0,3	1000	Punktdurch. Mit Auge nicht mehr zu erkennen

7.2 Tabellarische Auflistung zur Anzahl der Laserpunkte und Gerade

Datum	LfdNr.	Versuchsname	λ	Pulsbreite	LP	Beurteilung
14.06.2010	1	Gerade	1,9	0,001 s	10	Punkte dicht nebeneinander - Gerade zu kurz
14.06.2010	2	Gerade	1,9	0,001 s	5	Punkte dicht nebeneinander - Gerade zu kurz
14.06.2010	3	Gerade	1,9	0,002 s	5	Punkte dicht nebeneinander - Gerade zu kurz
14.06.2010	4	Gerade	1,9	0,002 s	10	Punkte dicht nebeneinander - Gerade zu kurz (550 μ m)
14.06.2010	5	Gerade	1,6	0,0025 s	10	Ersten 3-4 Punkte dicht nebeneinander
14.06.2010	6	Gerade	1,6	0,0033 s	10	Ersten 3-4 Punkte dicht nebeneinander
14.06.2010	7	Gerade	1,4	0,005s	10	Beide Laserpunkte dicht nebeneinander
14.06.2010	8	Gerade	1	0,01s (100 Hz)	10	keine Linie zu sehen
14.06.2010	9	Gerade	1,1	0,01s (100 Hz)	10	leichte Brennpunkte zu sehen
14.06.2010	10	Gerade	1,2	0,01s (100 Hz)	10	Punkte zu sehen
14.06.2010	11	Gerade	1	0,005s (200 Hz)	10	hauchdünner Strich
14.06.2010	12	Gerade	1,1	0,005s (200 Hz)	10	leichte Brennpunkte zu sehen
14.06.2010	13	Gerade	1,2	0,005s (200 Hz)	10	Punkte zu sehen
14.06.2010	14	Gerade	1,3	0,005s (200 Hz)	10	Punkte zu sehen
14.06.2010	15	Gerade	1	0,0067s (150Hz)	10	keine Linie zu sehen
14.06.2010	16	Gerade	1,1	0,0067s (150Hz)	10	hauchdünner Strich
14.06.2010	17	Gerade	1,2	0,0067s (150Hz)	10	Punkte zu sehen
14.06.2010	18	Gerade	1,3	0,0067s (150Hz)	10	Punkte zu sehen
14.06.2010	19	Gerade	1,2	0,01 s (100Hz)	15	Punkte zu sehen mit Überlappung
14.06.2010	20	Gerade	1,2	0,01 s (100Hz)	20	Überlappung -> Tendenz zum Strich
14.06.2010	21	Gerade	1,2	0,01 s (100Hz)	25	Strich
14.06.2010	22	Gerade	1,2	0,01 s (100Hz)	30	Strich
14.06.2010	23	Gerade	1,2	0,01 s (100Hz)	35	Strich

14.06.2010	24	Gerade	1,2	0,01 s (100Hz)	40	Strich
14.06.2010	25	Gerade	1,2	0,01 s (100Hz)	45	Strich
14.06.2010	26	Gerade	1,2	0,01 s (100Hz)	50	Strich
15.06.2010	27	Gerade	1,2	0,01 s (100Hz)	15	Punkte zu sehen
15.06.2010	28	Gerade	1,2	0,01 s (100Hz)	16	Punkte zu sehen
15.06.2010	29	Gerade	1,2	0,01 s (100Hz)	17	Punkte zu sehen
15.06.2010	30	Gerade	1,2	0,01 s (100Hz)	18	Punkte zu sehen
15.06.2010	31	Gerade	1,2	0,01 s (100Hz)	19	Punkte zu sehen
15.06.2010	32	Gerade	1,2	0,01 s (100Hz)	20	Punkte zu sehen
15.06.2010	33	Gerade	1,2	0,01 s (100Hz)	21	Punkte zu sehen
15.06.2010	34	Gerade	1,2	0,01 s (100Hz)	22	Überlappung -> Tendenz zum Strich
15.06.2010	35	Gerade	1,2	0,01 s (100Hz)	23	Überlappung -> Tendenz zum Strich mit starkem Brennpunkt
15.06.2010	36	Gerade	1,2	0,01 s (100Hz)	24	Überlappung -> Tendenz zum Strich mit starkem Brennpunkt
15.06.2010	37	Gerade	1,2	0,01 s (100Hz)	25	Überlappung -> Tendenz zum Strich mit starkem Brennpunkt
15.06.2010	38	Gerade	1,2	0,01 s (100Hz)	26	Überlappung -> Tendenz zum Strich mit starkem Brennpunkt
15.06.2010	39	Gerade	1,2	0,01 s (100Hz)	27	Überlappung -> Tendenz zum Strich mit starkem Brennpunkt
15.06.2010	40	Gerade	1,2	0,01 s (100Hz)	28	Überlappung -> Tendenz zum Strich mit starkem Brennpunkt
15.06.2010	41	Gerade	1,2	0,01 s (100Hz)	29	Überlappung -> Tendenz zum Strich mit starkem Brennpunkt
15.06.2010	42	Gerade	1,2	0,01 s (100Hz)	30	Überlappung -> Tendenz zum Strich mit starkem Brennpunkt