



Diplomarbeit

Entwicklung eines optischen Systems zur Evaluierung des Ermüdungsrissverhaltens von Elastomerwerkstoffen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs
unter Leitung von

Ao. Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Vasiliki-Maria Archodoulaki

Dipl.-Ing. Sandra Seichter

E308

Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Michael Kuhn, BSc.

Matrikel Nr. 0717591

Rieden 10, 6671 Rieden

Wien, am 19. Juni 2016

Unterschrift

Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit ist die Konstruktion eines Systems zur Erfassung der Rissinitiierung und Rissausbreitung von dynamisch belasteten Elastomeren. Die Grundlage bildet eine bestehende Zug-Druck-Prüfmaschine, deren Steuerung mit der LabVIEW® Entwicklungsumgebung realisiert ist. Die Steuerungssoftware wird erweitert um Anweisungslisten abzuarbeiten. Damit ist die Prüfmaschine in der Lage unbeaufsichtigte Belastungstests durchzuführen. Neben dem Interpreter der Anweisungsliste wird eine Schnittstelle programmiert, die der Kommunikation mit dem Kamerasystem dient. Das optische System besteht aus einer CMOS-Kamera, welche auf einer riemengetriebenen Linearführung die Probe zyklisch abfotografiert. Diese Fotos werden nach vollständiger Zerstörung der Probe in einem entkoppelten Programm vermessen, um signifikante Größen der Rissausbreitung zu bestimmen. Die Bildverarbeitung und Vermessung erfolgt mit dem LabVIEW® Vision Paket. Neben LabVIEW® arbeitet die erstellte Bildverarbeitungssoftware mit den frei erhältlichen Softwarepaketen ImageMagick, AutoHotKey und AutoStitch zusammen.

Abstract

This thesis deals with the construction of an optical analysis system for an existing material testing machine. It describes the construction of a system, which is being used to determine and analyse the crack initiation of elastomers under dynamic loads. A new software feature was programmed which enables the machine to process command lists. Thus, the machine is capable of conducting unattended load tests. An interface was designed to enable the program to control the camera system. The developed system uses a CMOS camera placed on a belt driven guide to check the samples for cracks. The software is designed in LabVIEW® and uses an Arduino microcontroller to communicate with the stepper motor drivers. The photos are analysed by a separate program which uses the LabVIEW® Vision Software. The system utilizes the freely available programs AutoHotKey, AutoStitch and ImageMagick.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, Michael Kuhn, die vorliegende Diplomarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der von mir angegebenen Literatur verfasst zu haben.

Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Wien, am 19. Juni 2016

MICHAEL KUHN

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit und dem gesamten Studium unterstützt haben.

Mein Dank gilt Frau Prof. Archodoulaki. Ohne sie wäre die Durchführung meiner Arbeit nicht möglich gewesen.

Ich danke Frau Dipl.-Ing. Sandra Seichter, die immer ein offenes Ohr für meine Anliegen hatte und mir die Freiheit gegeben hat, die Arbeit nach meinen Vorstellungen durchzuführen.

Ein besonderer Dank gilt dem Erbauer des Prüfstands Hannes Brandstätter, der mir während der Diplomarbeit stets mit seinem umfassenden Wissen zur Seite stand. Die zahlreichen Diskussionen über Konstruktion und Realisierung verschiedenster Funktionen bereiteten mir viel Freude. Danke für alles, Hannes!

Ich danke meiner Familie, welche mich nicht nur finanziell unterstützt, sondern mich auch stets motiviert und so maßgeblich zu meinem Studienerfolg beigetragen hat.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meinen Studienkollegen bedanken, mit denen ich zahlreiche lernintensive, aber stets von Heiterkeit begleitete Tage verbracht habe.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ausgangszustand der Zug-Druck-Prüfmaschine	1
1.3	Problemstellung	3
2	Werkstofftechnische Grundlagen	5
2.1	Elastomere	5
2.2	Styrol-Butadien-Kautschuk	8
2.3	Füllstoffe	8
2.4	Weichmacher, Additive, Alterungs- und Witterungsschutz	10
2.5	Dynamische Versuche	11
2.6	Rissausbreitung in Elastomeren	13
2.6.1	Rissöffnungsarten	13
2.6.2	Fließbruchmechanik	14
2.6.3	Griffith-Kriterium	14
2.6.4	Reißenergie-Konzept	15
3	Konstruktion	16
3.1	Aufbau des optischen Systems	16
3.2	Beleuchtung	16
3.3	Elektronik	17
4	Verwendete Software	21
4.1	LabVIEW [®] Entwicklungsumgebung	21
4.2	Vision Development Kit	21
4.3	LIFA	21
4.4	AutoStitch	22
4.5	AutoHotKey	22

4.6	Fulla	23
4.7	Mogrify	23
4.8	Kommerzielle Realisierungen optischer Systeme	23
5	Programmierung der Schnittstelle	26
5.1	Hauptprogramm	26
5.2	Anweisungsliste und Interpreter	27
5.3	Abarbeitung/Fallunterscheidung der Anweisungsliste	28
5.3.1	Kurve fahren - Fall 1	28
5.3.2	Position anfahren - Fall 2	33
5.3.3	Wartezeit - Fall 3	33
5.3.4	Sprunganweisung - Fall 4	33
5.3.5	Ausgänge - Fall 5	34
5.3.6	Eingänge - Fall 6	34
5.3.7	Fotostopp - Fall 7	35
5.3.8	Rampe - Fall 8	36
5.4	Einstellung der Fotoerstellung	36
6	Programmierung und Ablauf der Analysesoftware	39
6.1	Panoramaerstellung	39
6.1.1	Funktion - Bilder suchen	39
6.1.2	Funktion - Panoramen erstellen	40
6.2	Vermessen	42
6.3	Fortschrittsbild	46
6.4	Einstellungen	47
7	Messungen	48
7.1	Prüfmethodik	48
7.2	Belastungsroutine	48

7.3	Fortschrittsbild	49
7.4	Risswachstums-Messungen	50
7.5	Interpretation der Risswachstumsmessungen	51
8	Zusammenfassung und Ausblick	52

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
E	$\frac{N}{mm^2}$	E-Modul
σ	$\frac{N}{mm^2}$	Spannung
ε	%	Dehnung
F	N	Kraft
A	mm^2	Fläche
Δl	%	Längenänderung
l_0	m	ursprüngliche Länge
η	$\frac{m^2}{s}$	dynamische Viskosität
τ	$\frac{N}{mm^2}$	Schubspannung
A_σ	$\frac{N}{mm^2}$	Amplitude Spannung
A_ε	%	Amplitude Dehnung
A_ω	$\frac{1}{s}$	Kreisfrequenz
E^*	$\frac{1}{s}$	komplexer Modul
E'	$\frac{N}{mm^2}$	Speichermodul
E''	$\frac{N}{mm^2}$	Verlustmodul
δ	°	Verlustwinkel
W_M	Nm	mechanisch gespeicherte Energie
W_O	Nm	Oberflächenenergie
G	N	spezifische Oberflächenenergie
a	m	Risslänge
γ_0	N	Energiefreisetzungsrate
A_p	m^2	Rissoberfläche

1 Einleitung

In den folgenden Kapiteln wird auf die aktuelle Situation bzw. die Herausforderungen bei der Verwendung von Elastomeren als Konstruktionswerkstoff eingegangen. Anschließend wird beschrieben, in welchem Ausgangszustand sich das Zug-Druck-Prüfgerät befindet. Darauf aufbauend werden die Anforderungen an die Erweiterung definiert, welche zur Ermittlung der gewünschten Risskenngrößen dient.

1.1 Motivation

Elastomere sind zu einem wichtigen Konstruktionswerkstoff der heutigen Zeit geworden. Der spezielle molekulare Aufbau gibt den Elastomeren einzigartige Eigenschaften und macht sie damit unverzichtbar für viele Anwendungen. Dennoch fällt es Herstellern oft schwer genaue Vorhersagen über die Lebensdauer der verwendeten Mischung zu treffen. Dies ist durch den Stand der Forschung bedingt, der im Vergleich zu Metallen noch recht jung ist. Grundlage für die Abschätzung der Lebensdauer unter bestimmten Belastungsverhältnissen stellen Wöhlerkurven dar. Da die Zusammensetzung der Elastomere in hohem Maße variiert, sind Wöhlerkurven der jeweiligen Mischung nur schwer oder gar nicht in der Fachliteratur zu finden. Dies ist auf den erheblichen Aufwand der Belastungstests zurückzuführen, der nötig ist um die empirischen Daten zu sammeln. Die sichere Auslegung von Elastomerbauteilen stellt daher auch unter Verwendung modernster Simulationsmethoden (Finite-Elemente) eine Herausforderung dar. Um Lebensdauerermessungen durchzuführen, wurde von Hannes Brandstätter eine Zug-Druck-Prüfmaschine entworfen und aufgebaut (Abb. 1). Diese stellt den Ausgangspunkt der Arbeit dar.

1.2 Ausgangszustand der Zug-Druck-Prüfmaschine

Da bei dem Prüfstand hohe dynamische Kräfte auftreten, wurde bei der Konstruktion ein Rahmen aus U-Trägern verwendet (Abbildung 1). Diese sind an der Bodenplatte an zwei Punkten mit dem restlichen Aufbau verbunden und machen den Aufbau damit schwingungsfähig. Etwaige Stöße werden vermindert in die Reststruktur eingeleitet. In den zwei Querträgern, befinden sich zwei Achsen, welche als Führung der unteren beweglichen Backe fungieren. Zur Lagerung werden Gleitlager aus Teflon verwendet.



Das Antriebskonzept basiert auf einen Linearmotor der Firma LinMOT. Der Antrieb besteht aus drei Hauptkomponenten.

- Steuerungseinheit (Drive) - Typ E1450
- Stator - Typ PS10-70x400U-BL-QJ
- Läufer - Typ PL10-28x590/540 (L:590 mm, D:28mm)

Die Linearmotoren sind elektromagnetische Direktantriebe; sie setzen lineare Bewegungen ohne zusätzliche Riemen oder sonstige verschleißbehaftete Bauteile um. Grundlage hierfür sind sehr starke Neodym-Magnete im Läufer, welche durch ein wechselndes elektromagnetisches Feld im Stator Kräfte erfahren und dadurch bewegt werden. Der Motor verfügt über eine interne Positionssensorik. Er überwacht ständig die Läuferposition und gleicht diese im Fall einer Differenz zum Sollwert sofort aus. Der Linearmotor kann durch einfache Befehle, sowie

Abbildung 1: Zug-Druck-Prüfmaschine durch komplexe Kurven, welche auf dem Drive (Steuerungseinheit) abgelegt werden, gesteuert werden. Der Motor kann eine Spitzenkraft von 2703 Newton aufbringen. Die Kommunikation bzw. Konfiguration der Steuerungseinheit erfolgt über die Ethernet-Schnittstelle durch ein LabVIEW-Programm.

Zu Beginn der Diplomarbeit wurde die Maschine durch ständiges Eingreifen des Benutzers gesteuert. Es konnten zwar Kurven auf dem Drive abgelegt und gefahren werden, jedoch war es nicht möglich Anweisungslisten abzuarbeiten. Nach dem Abschluss der Zyklenanzahl pausierte das Programm, bis ein weiterer Befehl durch den Benutzer gestartet wurde. Die Steuerung erfolgte durch das Notprogramm (Abbildung 2).

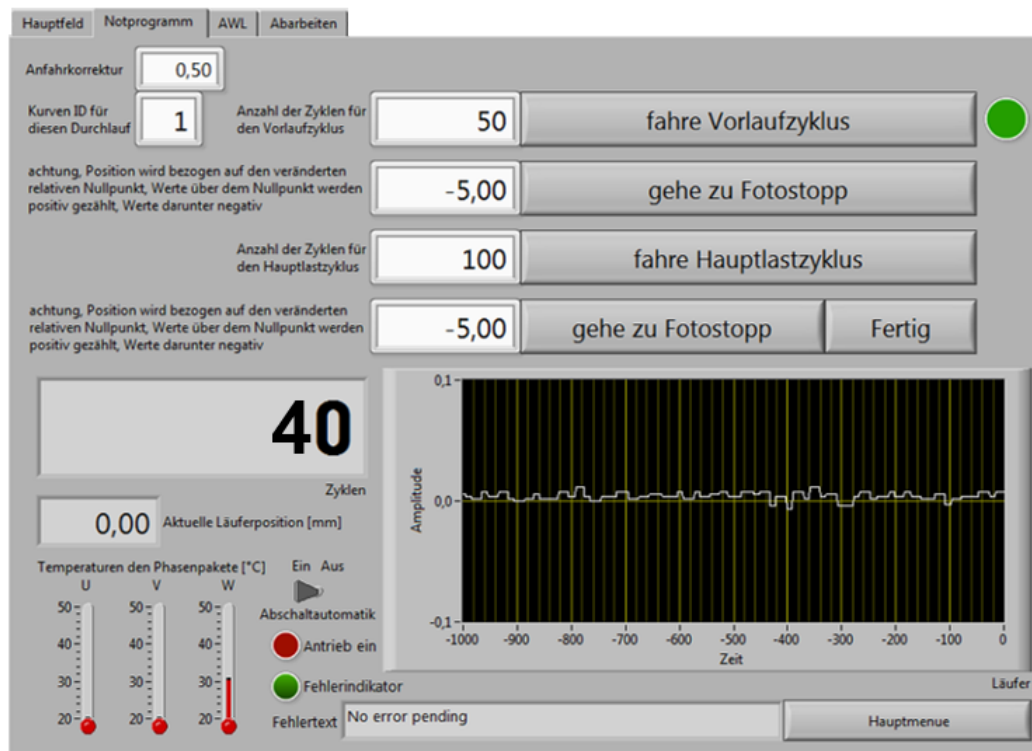


Abbildung 2: Ausgangszustand des Interpreters, das Notprogramm

Die Kamera war anfänglich auf einer Linearführung, die auf einem höhenverstellbaren Laborständer montiert war, befestigt. Das Abfotografieren der Proben war zwar prinzipiell möglich, jedoch musste die Positionierung und das Auslösen manuell vorgenommen werden. Die Ermittlung von Risslängen und Ausbreitungsraten war zu dieser Zeit nur durch manuelle Vermessung in einem externen Programm möglich.

1.3 Problemstellung

Durch den kontinuierlichen Betrieb der Maschine ist es nicht möglich festzustellen, bei welchem Zyklus sich ein Riss bildet bzw. an welcher Stelle der Probe sich dieser entwickelt. Es lassen sich auch keine Aussagen über die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Risses machen. Für eine optische Überwachung muss der Test in bestimmten Abständen unterbrochen werden, um Aufnahmen der Proben unter einer gewissen Auslenkung zu machen. Dazu muss ein Interpreter programmiert werden,

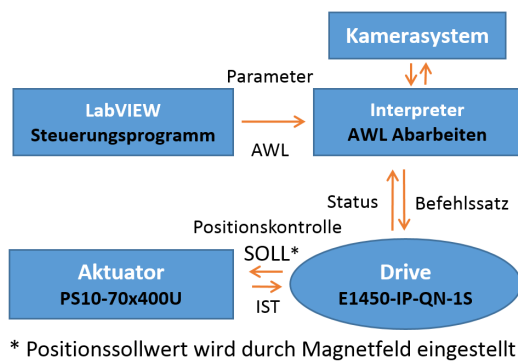


Abbildung 3: Abstrakte Darstellung der Steuerung

dieser Bilder soll die Software in der Lage sein die Rissausbreitungsrate der Probe zu ermitteln. Die Verarbeitung der Fotos soll mit dem LabVIEW Vision Paket erfolgen und wenn möglich, entkoppelt vom bestehenden Programm arbeiten. Ein weiteres Problem ist der instabile Lauf der LabVIEW-Steuerungssoftware. Es kommt zu wiederholten, jedoch zeitlich nicht exakt wiederkehrenden Abstürzen der Software, was einen unbeaufsichtigten Lauf der Maschine zu Beginn der Arbeit nicht möglich machte. Um das Budget zu schonen sollte möglichst viel im Eigenbau angefertigt werden, wobei auf die Ressourcen des Instituts zurückgegriffen werden darf. Wichtig bei der Konstruktion ist die einfache Montage, da das System in Zukunft noch erweitert wird. Dementsprechend soll der Auf- und Abbau unkompliziert erfolgen.

welcher in der Lage ist Anweisungslisten abzuarbeiten. Neben den verschiedenen Fällen der Anweisungsliste (AWL), welche noch nicht implementiert sind, soll ein optisches System entwickelt werden, das ebenfalls mit dem bestehenden Messaufbau kommuniziert. Die Struktur der Steuerung ist in Abbildung 3 dargestellt. Hauptaufgabe des Kamerasystems ist es die Oberfläche der Proben automatisch zu fotografieren, um den Ort der Rissbildung bestimmen zu können. Anhand

2 Werkstofftechnische Grundlagen

Elastomere zeigen im Vergleich zu anderen Werkstoffen ein ausgeprägtes elastisches und viskoses Verhalten [1]. Die Werkstoffkenngrößen Elastizitätsmodul (kurz E-Modul) und Schubmodul hängen neben der Temperatur, auch stark von der Deformationsgeschwindigkeit und der Belastungsdauer ab. Im Folgenden werden die Eigenschaften beschrieben, sowie die zugrunde liegenden Methoden erklärt, die zum Verständnis des Elastomerverhaltens notwendig sind.

2.1 Elastomere

Im unbelasteten Zustand bestehen die Elastomere aus einem grobmaschig verknüpften Netz von verknäulten Makromolekülen (siehe Abbildung 4). Dieses weitmaschige Netz ermöglicht die Bewegung der Polymerketten zueinander und macht damit die Verformung des Elastomers unter Belastung möglich. Wird ein ideales Elastomer wieder entlastet, findet dieses in die Ausgangsform zurück und ist daher als formfest anzusehen [1]. Werden Elastomere mit Ruß gefüllt um die Eigenschaften zu verändern, ist die ideale Formfestigkeit nicht mehr gegeben.

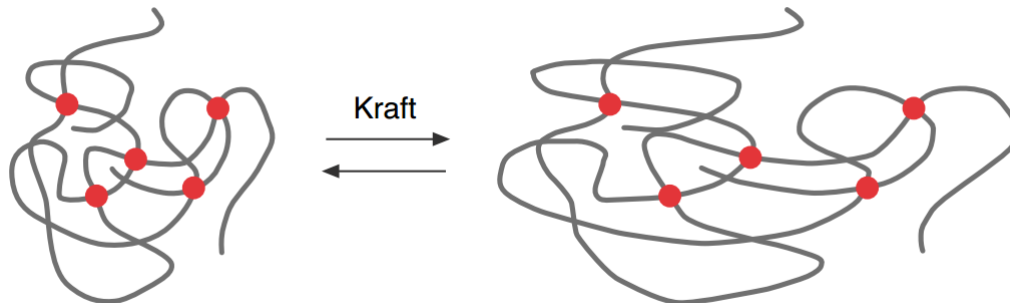


Abbildung 4: schematische Darstellung des Aufbaus im ungedehnten (links) und gedehnten (rechts) Zustand [2]

Neben der extremen Dehnbarkeit besitzen Elastomere hervorragende Dämpfungseigenschaften. Die Dämpfungseigenschaft resultiert aus der Energiedissipation bzw. der Wärmeentwicklung bei der Verformung. Durch das dämpfende Verhalten kommen Elastomere oft bei hochdynamischen Maschinen zum Einsatz. Vor allem in der Antriebstechnik werden sie verwendet um Resonanzerscheinungen entgegenzuwirken. Durch

die Zwischenschaltung von Elastomerkränzen in Kupplungen werden Resonanzfrequenzen von Antriebssträngen in unkritische Bereiche verschoben bzw. Stöße des Antriebs abgefangen [3]. Die Einsatztemperatur von Elastomeren liegt immer über der Glasübergangstemperatur, da sie nur in diesem Bereich die elastischen Eigenschaften besitzen. Beim Unterschreiten der Glasübergangstemperatur verspröden sie stark und verlieren an Festigkeit. Als obere Grenze der Einsatztemperatur ist die Zersetzungstemperatur der jeweiligen Mischung anzusehen [4]. Bei der Verwendung von Elastomeren unter dynamischen Belastungsbedingungen sind neben den statischen Werkstoffkennwerten auch dynamische Werte von Bedeutung. Hier spielt bei der Ermüdungsfestigkeit die Rissinitiierung und Rissausbreitung eine wichtige Rolle. Risse in Elastomeren führen zu einer Verringerung der Lebensdauer, Zuverlässigkeit, Verlust der Dämpfungseigenschaften und oft auch zum Versagen der Bauteile. In den meisten Fällen muss das Elastomer ausgetauscht werden. Dies ist mit hohen Kosten sowie ungewollten Maschinenstillstand verbunden [5].

Ein wichtiges Einsatzgebiet für Elastomere in der Antriebstechnik stellen Riemen dar (Abbildung 5). Da sie in Zugrichtung oft großen Kräften ausgesetzt, jedoch für diese nicht ausgelegt sind, werden sie oft mit Fasern unterstützt. Die Fasern nehmen die Belastungen in Zugrichtung auf und entlasten damit die Elastomermatrix. Während des Betriebs erfahren die Riemen zyklische Dehnung an der vom Riemenrad abgewandten Seite, sowie Stauchung auf der zugewandten Seite. Durch die Dehnung kommt es zu hohen Zugspannungen, welche ihr Maximum an der Riemenoberfläche annehmen. Diese begünstigen die Initiierung und Ausbreitung von Rissen [6].

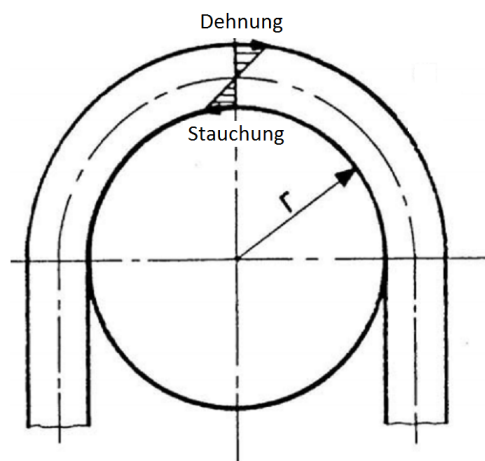


Abbildung 5: Biegebelastung beim Umlauf eines Riemens [3]

Weltweit wurden im Jahr 2011 rund 11 Millionen Tonnen Naturkautschuk und 14 Millionen Tonnen Synthetikautschuk verarbeitet [7]. Der größte Teil der Kautschuke (54 %) wird für die Produktion von Reifen verwendet. Die übrigen 46 % entfallen auf andere technische Elastomererzeugnisse wie z.B. Dichtungen, Profile oder Förderbänder. Rohstoffpreise und Energiekosten stellen einen großen Faktor bei der Synthetikautschukproduktion dar. Dies ist auf die Vormaterialien Ethylen, Butadien, Propylen und Styrol zurückzuführen, deren Preise stark mit dem Rohölpreis verknüpft sind [4].

Elastomere sind Gemische, welche neben dem Grundpolymer aus bis zu 20 verschiedenen Komponenten bestehen. Hierzu zählen Füllstoffe, Weichmacher, Verarbeitungshilfsmittel, Alterungsschutzmittel, Vulkanisiermittel, Vulkanisationsbeschleuniger, Aktivatoren, Vulkanisationsverzögerer, Pigmente usw. Im Durchschnitt besteht eine Elastomermischung aus 10 bis 20 Komponenten. Jede Komponente erfüllt hierbei einen bestimmten Zweck, sodass sich die physikalischen und chemischen Eigenschaften gemäß den Anforderungen an den Kunststoff gut einstellen lassen [4]. Die Gesamtheit der Mischung wird als Elastomermischung oder Elastomercompound bezeichnet. Die Haupteffekte, welche im Regelfall angestrebt werden, sind nach [4] folgende:

- Verstärkung durch Füllstoffe
- bessere Verarbeitbarkeit
- bessere Vernetzung des Kautschuks durch Vulkanisationsmittel
- Schutz vor äußeren Einflüssen

Die Kälteflexibilität (Lage der Glasübergangstemperatur) und das Verhalten gegenüber verschiedenen Medien wie Ölen, Treibstoffen und Lösungsmitteln werden durch den verwendeten Kautschuk bestimmt. Andere mechanischen Eigenschaften wie Elastizität und Festigkeit hängen neben dem Polymer, auch stark von den verwendeten Füllstoffen (verstärkende Ruße, helle Füllstoffe) ab. Mit Zusatzstoffen lassen sich Eigenschaften wie Härte, Kälteflexibilität, Stoßelastizität und Druckverformungsrest verbessern [4]. Durch das Compoundieren mit verschiedenen Kautschuken können nicht nur die Grundeigenschaften, sondern auch der Preis an die jeweilige Verwendung angepasst werden.

2.2 Styrol-Butadien-Kautschuk

Bedingt durch einen starken Preisanstieg von Naturkautschuk in den 20er Jahren erfuhr die Forschung im Bereich von Synthetikautschuken einen Aufschwung. Die Herstellung von SBR aus Styrol und Butadien mit dem Emulsionspolymerisations-Verfahren (E-SBR) durch Bock und Tschunkur war ein wichtiger Schritt in der Synthetikautschukproduktion. Später folgte die anionische Copolymerisation von Butadien und Styrol mit Lithiumalkalyen in Lösung (S-SBR) [8]. Das Lösungspolymerisat ist abriebfester und dynamisch belastbarer und wird vor allem bei der Reifenproduktion in der Lauffläche verarbeitet [4, 8]. SBR besitzt heutzutage den größten Marktanteil der Synthetikautschuke. Im Vergleich zu Naturkautschuk besitzt SBR allerdings niedrigere Festigkeit und geringeren Risswachstumswiderstand. Außerdem reagiert SBR empfindlich auf Ozon, Sauerstoff und Wärme [4, 8]. Die mechanischen Eigenschaften können in hohem Maße durch die Zugabe von Füllstoffen beeinflusst werden. Die Emulsionspolymerisation findet bei unterschiedlichen Temperaturen statt, so kann man zwischen Kalt- (5°C) und Warmpolymerisationsverfahren (40°C - 50°C) unterscheiden. Der mittels Kaltemulsionspolymerisationsverfahren hergestellte SBR verfügt über wenige Verzweigungen bei niedrigem Gelanteil. Aufgrund der wenigen Verzweigungen besitzt er auch bei niedrigen Temperaturen eine hohe Elastizität. Der niedrige Gelanteil wirkt sich gut auf die Verarbeitungseigenschaften aus. Das Warmpolymerisationsverfahren wird nur mehr zur Herstellung von verzweigten bzw. vorvernetzten Kautschuken verwendet. Die häufigste Verwendung findet E-SBR mit einem Styrolgehalt von 23,5 % und einer Glasübergangstemperatur von ca. -50°C [4, 8]. Ein steigender Styrolgehalt bewirkt zwangsläufig auch das Ansteigen der Glasübergangstemperatur. Die durch die anionische Polymerisation hergestellten Kautschuke können in Mikro- und Makrostruktur besser beeinflusst werden. Abhängig vom verwendeten Katalysator, Polymerisationsbedingungen und Lösungsmittel erhält man statistisch verteilte Monomereinheiten oder Blockcopolymere [8].

2.3 Füllstoffe

Zur Verbesserung der Eigenschaften von SBR werden Füllstoffe eingesetzt. Sie können in aktive (verstärkende) und inaktive Füllstoffe unterteilt werden. Aktive Füllstoffe (Ruß und Kieselsäure) wirken sich auf die Matrix aus und verändern deren mechanische Eigenschaften (Zugfestigkeit, Reißfestigkeit, Weiterreißwiderstand und Abrieb). Inaktive Füllstoffe bewirken ein Verdünnen der Matrix, sie können außerdem Werk-

stoffeigenschaften wie Gasundurchlässigkeit und Verarbeitbarkeit positiv beeinflussen [8]. In Abbildung 6 ist der Einfluss der Füllstoffmenge auf verschiedene mechanische Eigenschaften dargestellt.

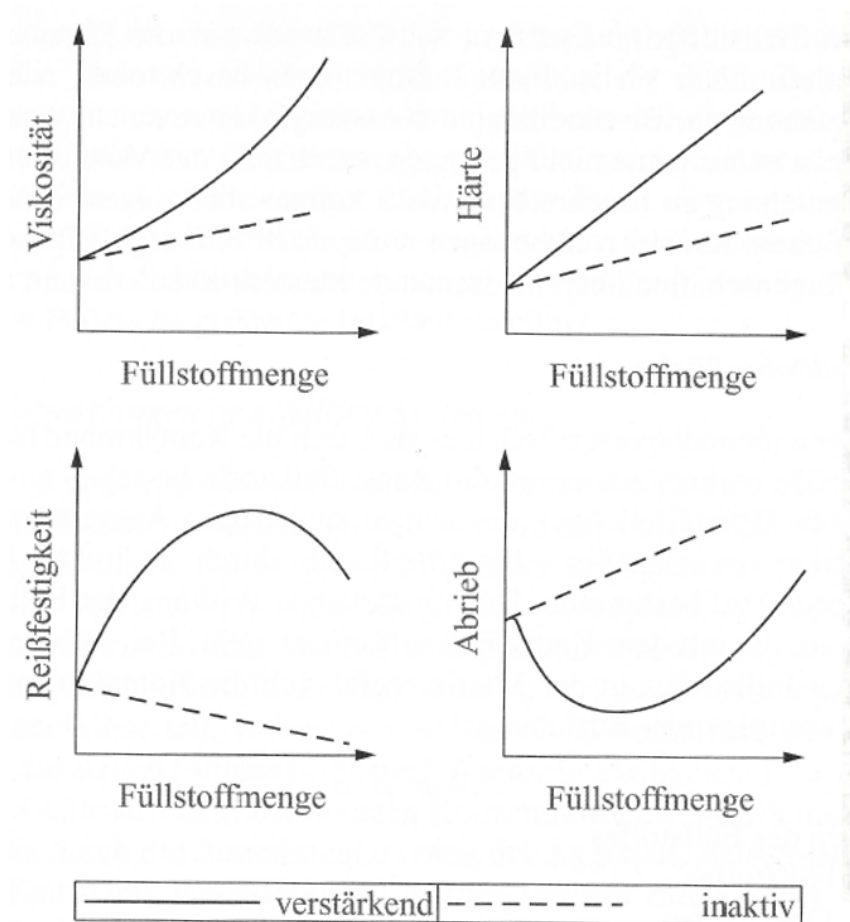


Abbildung 6: schematische Darstellung des Einflusses aktiver und inaktiver Füllstoffe auf die Eigenschaften des amorphen Kautschuks [8]

Die verstärkende Wirkung von Füllstoffen ist auf drei wesentliche Faktoren zurückzuführen:

- der Kontaktfläche (Extensitätsfaktor)
- der Oberflächenaktivität (Intensitätsfaktor)
- der Struktur (geometrischer Faktor)

Die verstärkende Wirkung hängt von der mit dem Kautschuk in Verbindung stehenden Kontaktfläche der Teilchen ab und wird mit dem Extensitätsfaktor beschrieben. Die Oberflächenaktivität beschreibt die Wechselwirkung zwischen Füllstoff und Kautschuk durch unspezifische, dispersive Van der Waals Kräfte, polaren Wechselwirkungen, durch Dipol-Dipol Kräfte, Wasserstoffbrücken oder chemische Bindungen. Einen weiterer Einflussfaktor stellt die Morphologie (Größe, Form und Größenverteilung der Agglomerate) der Füllstoffteilchen dar (geometrischer Faktor).

2.4 Weichmacher, Additive, Alterungs- und Witterungsschutz

Weichmacher erniedrigen die Viskosität des unvulkanisierten Polymers und machen es fließfähiger. Dadurch ist es leichter verarbeitbar, was sich in niedrigeren Energiekosten bei der Herstellung niederschlägt [8]. Ebenso begünstigen Weichmacher die erwünschte, homogene Verteilung von Füllstoffen. Neben diesen Faktoren bewirkt der Weichmacher in der Regel eine Verbesserung der Kälteflexibilität. Schlecht wirkt sich jedoch zunehmender Weichmachergehalt auf die Heißluftbeständigkeit aus. Mit steigendem Weichmachergehalt steigt ebenfalls die Ausdampfungsmenge, des flüchtigen Weichmachers. Dies resultiert in einem Härteanstieg [4]. Weichmacher können in primäre und sekundäre Weichmacher unterteilt werden. Primäre Weichmacher sind in ihrer chemischen Struktur ähnlich dem Kautschuk und werden von den Ketten aufgenommen bzw. gelöst. Durch die Aufnahme des niedrigviskosen Weichmachers erfährt die gesamte Mischung ebenfalls eine starke Viskositätserniedrigung. Sekundäre Weichmacher sind in der chemischen Struktur unterschiedlich zu dem Polymer und werden zwischen die Kautschukketten eingelagert. Sie wirken als eine Art Gleitmittel und steigern dadurch die Verformbarkeit des Kautschuks.

Zusätzlich beigemischte Additive sind natürliche oder synthetische Harze, die als Klebrigmacher eingesetzt werden sowie Fettsäuren, welche als Verarbeitungshilfsmittel fungieren. Wie alle Dien-Kautschuke ist SBR nicht alterungs- witterungs- und ozonbeständig. Im Gegensatz zu Naturkautschuk, der durch die Kettenzersetzung bei thermischer Alterung eine Härteabnahme, erfährt kommt es bei SBR zur Nachvernetzung und damit einhergehend zu einer Härtezunahme. Einen positiven Einfluss auf den oxidativen Abbau haben p-Phenylendiamine. Sie verbessern zusätzlich die Lebensdauer bei dynamischer Belastung. Um die Beständigkeit bei hohen Temperaturen zu verbessern, können polymerisiertes Trimethyl-Dihydroquinolin (TMQ) oder octyliertes Diphenylamin eingesetzt (ODPA) werden. SBR reagiert empfindlich auf Ozon. Aus diesem Grund ist bei Einsatz im Freien die Verwendung von Ozonschutzwachsen notwendig [4, 8].

2.5 Dynamische Versuche

Bei dynamischen Versuchen wird die Probe zyklisch be- und entlastet. Dies erfolgt bei vorgegebener Kreisfrequenz ω und Amplitude A_σ (Abbildung 7).

$$\sigma(t) = A_\sigma \sin(\omega t) \quad (1)$$

Bei ideal-elastischen Materialien ist die Dehnung ε in Phase mit der Spannung σ , sodass die Dehnung mit folgender Gleichung beschrieben werden kann.

$$\varepsilon(t) = A_\varepsilon \sin(\omega t) \quad (2)$$

Da es sich bei Elastomeren um visko-elastisches Material handelt, liegt die Dehnung nicht in Phase und die Gleichung besitzt nun eine Phasenverschiebung δ [9].

$$\varepsilon(t) = A_\varepsilon \sin(\omega t + \delta) \quad (3)$$

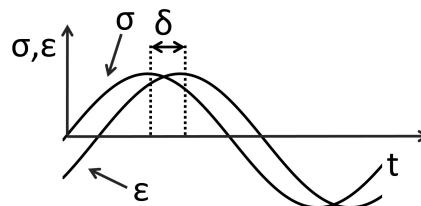


Abbildung 7: Phasenverschiebung [10]

Um dieses Verhalten besser zu verstehen, wird zunächst der komplexe Modul E^* (Abbildung 8) eingeführt. Man definiert ihn wie folgt:

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

$$E^* = \frac{A_\sigma \sin(\omega t)}{A_\varepsilon \sin(\omega t + \delta)} \quad (5)$$

$$E^* = \frac{A_\sigma e^{i\omega t}}{A_\varepsilon e^{i\omega t - \delta}} = \frac{A_\sigma}{A_\varepsilon} e^{i\delta} \quad (6)$$

$$|E^*| = \frac{A_\sigma}{A_\varepsilon} \quad (7)$$

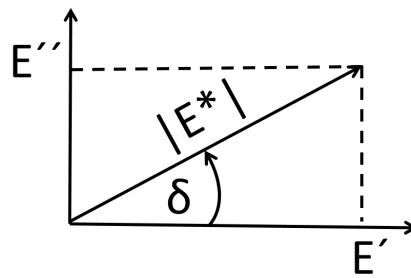


Abbildung 8: Komplexer Modul - Zeigerdiagramm [10]

Der Realanteil des komplexen Moduls wird als Speichermodul E' definiert. Der Speichermodul liegt in Phase mit der Spannung und charakterisiert die Steifigkeit.

$$E' = |E^*| \cos(\delta) \quad (8)$$

Der Imaginäranteil des komplexen Moduls wird als Verlustmodul E'' definiert. Der Verlustmodul charakterisiert die innere Dämpfung des Materials.

$$E'' = |E^*| \sin(\delta) \quad (9)$$

In Abbildung 9 lässt sich der Zusammenhang von Dehnung und Spannung erkennen. Die von der Ellipse umschlossene Fläche entspricht der Verformungsenergie, wel-

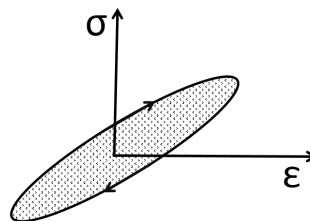


Abbildung 9: Spannungs-Dehnungs Diagramm mit Hystereseschleife [4]

che bei harmonischer Belastung in Wärme umgewandelt wird. Dieser Teil der Verformungsenergie wird als Gummihysterese bezeichnet. Die Verlustenergie pro Zyklus berechnet sich wie folgt [10]:

$$\frac{\text{Verlustenergie}}{\text{Zyklus}} = \pi E'' A_\varepsilon^2 \quad (10)$$

2.6 Rissausbreitung in Elastomeren

Ausgehend vom dem zu untersuchenden Werkstoff können verschiedene Methoden zur Berechnung der Rissausbreitung verwendet werden. In Fall der Elastomere ist die plastische Verformung des Prüfkörpers nicht vernachlässigbar. Aus diesem Grund müssen fließbruchmechanische Methoden zur Beschreibung des Verhaltens verwendet werden.

2.6.1 Rissöffnungsarten

In der Bruchmechanik spielen die Spannungsfelder an den Rissspitzen eine wichtige Rolle. Die Intensität der Spannungen wird mit einem Faktor beschrieben, welcher neben der Geometrie auch die Rissöffnungsart und Belastungsart berücksichtigt. Es werden generell 3 Typen der Rissöffnung unterschieden (Abbildung 10). Modus 1 beschreibt einen Riss, bei dem sich die Flächen symmetrisch und senkrecht zur Rissausbreitungsrichtung abheben. Diese Art ist charakteristisch für Zug-Belastungen. Der Modus 2 tritt bei ebener Schubbelastung auf. Die Bruchflächen gleiten gegensätzlich in Rissausbreitungsrichtung. Modus 3 tritt bei Scherspannungen quer zur Rissausbreitungsrichtung auf. Diese Art der Rissöffnung ist vor allem bei Torsions-Belastungen zu beobachten. Tritt eine kombinierte Belastung auf, spielt der Modus 1 die größte Rolle, da das Material bei Zug-Beanspruchung die geringste Festigkeit besitzt. Im Folgenden wird nur der Modus 1 behandelt, da dieser bei den durchgeführten Versuchen die wichtigste Rolle einnimmt [11].

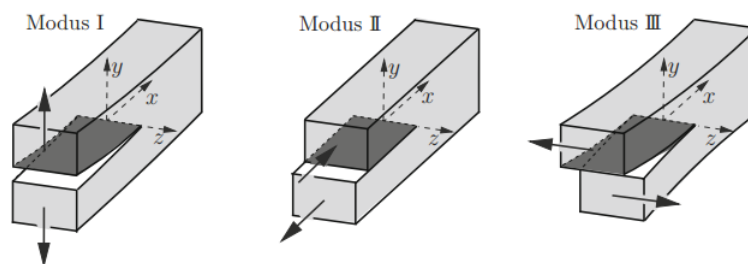


Abbildung 10: Rissöffnungsarten [11]

2.6.2 Fließbruchmechanik

Um das Verhalten von Elastomeren zu beschreiben, reichen die Methoden der linear-elastischen Bruchmechanik, welche in dieser Arbeit nicht weiter beschrieben werden, nicht aus. Das Verhalten unterscheidet sich grundlegend. So dissipiert bei Elastomeren in der Risspitze Energie. Diese Eigenschaft muss in den Methoden berücksichtigt werden. Neben der Energiedissipation ist die starke Verformung der Elastomere ein weiterer Grund für die Verwendung fließbruchmechanischer Methoden. Den wichtigsten Vertreter zur Beschreibung der Rissinitiierung und des Rissfortschritts von Elastomeren stellt das Reißenergie-Konzept dar. Das Reißenergie-Konzept basiert auf dem Griffith-Kriterium, welches im Folgenden erklärt wird.

2.6.3 Griffith-Kriterium

Die Gesamtenergie $W = W_M + W_O$ pro Einheitsdickenelement eines rissbehafteten Körpers besteht laut Griffith aus der mechanisch gespeicherten Energie W_M sowie der Oberflächenenergie $W_O = 2a\gamma_O$. Die Oberflächenenergie ist berechenbar durch γ_O , der spezifische Oberflächenenergie, und a , der Risskonturlänge. Beim Wachsen eines Risses in einem Körper nimmt die mechanische Energie ab ($\frac{dW_M}{da} < 0$) und begünstigt damit das Risswachstum. Durch das Risswachstum entstehen neue Rissoberflächen, welche wiederum das Wachstum behindern ($\frac{dW_O}{da} > 0$). Griffith nahm an dass die Änderung der Gesamtenergie in Abhängigkeit der Risslänge Null ist ($\frac{dW}{da} = 0$). Der Riss gewinnt nach dieser Überlegung an Länge, wenn die freiwerdende potentielle Energie ausreicht um neue Oberflächen an der Risspitze zu erzeugen. Der Ausdruck $G = \frac{-dW_M}{da}$ wird als Energiefreisetzungsrates bezeichnet. Die Dimension der Energiefreisetzungsrates entspricht einer Kraft und folglich wird der Ausdruck oft auch als Rissausbreitungskraft bezeichnet. Es lässt sich ein kritischer Wert berechnen, bei dem sich ein Riss vergrößert $G = G_C = \gamma_0$. Verhält sich der Werkstoff linear, kann das Hookesche-Gesetz zur Berechnung der mechanischen Energie genutzt werden. Somit lässt sich zu jeder Risslänge eine kritische Spannung errechnen, bei der das Bauteil versagt. Diese Gleichung wird als Griffith Gleichung bezeichnet [12].

$$\sigma_{krit} = \sqrt{\gamma_O \frac{E}{a}} \quad (11)$$

2.6.4 Reißenergie-Konzept

Das auf dem Griffith-Kriterium [13] basierende Reißenergie-Konzept von Rivlin und Thomas [14] beschreibt die Reduktion der gespeicherten elastischen Energie dW_{EG} durch das Wachstum der Rissoberfläche dA_p infolge eines fortschreitenden Risses um die Länge da .

$$-\frac{dW_{EG}}{da} \geq \gamma_O \frac{dA_p}{da} \quad (12)$$

Hierbei beschreibt die linke Seite die Veränderung der gespeicherten elastischen Energie und die rechte Seite die dafür notwendige Energie. Die Rissoberfläche ist folgendermaßen definiert; sie nimmt bei dünnen Körpern mit der Dicke B eine vereinfachte Form an:

$$A_p = 2aB. \quad (13)$$

Die Änderung der Rissfläche mit der Risslänge ergibt sich dann zu:

$$\frac{dA_p}{da} = 2B. \quad (14)$$

Einsetzen von Gleichung 14 in Gleichung 12 ergibt:

$$-\frac{dW_{EG}}{da} \geq 2\gamma_O B. \quad (15)$$

Da Elastomere sich nichtlinear verhalten und Energie bei der Verformung dissipiert wird ist die Gleichung in dieser Form nicht gültig. Rivlin und Thomas definierten, dass die Energiedissipation in der Risspitze erfolgt und durch folgenden Term beschrieben werden kann.

$$T = -\frac{1}{B} \frac{dW_{EG}}{da} \quad (16)$$

Der Term wird als Reißenergie eines Werkstoffs bezeichnet und ersetzt das $2\gamma_O$ der ursprünglichen Gleichung 16.

Weitere theoretische Modelle der Rissausbreitung stellen das J-Integral und das CTOD Konzept dar, welche in dieser Arbeit nicht näher behandelt werden.

3 Konstruktion

In den folgenden Unterkapiteln wird auf die mechanische und elektronische Konstruktion eingegangen. Es ist zu erwähnen, dass bei der Realisierung des Systems stets darauf geachtet wurde das Projektbudget zu schonen. Dementsprechend wurden bei der Konstruktion viele Teile eigenständig gefertigt. Die Kostenaufstellung des Systems befindet sich in Tabelle 2 auf Seite 53.

3.1 Aufbau des optischen Systems

Das System besteht aus zwei Schlitten: dem Kameraschlitten (Abbildung 11) auf der Vorderseite (Benutzer zugewandte Seite der Prüfmaschine mit Indikatorenpanel) und dem Beleuchtungsschlitten auf der Rückseite. Die Schlitten sind notwendig, da die Kamera entlang der Probe verfahren wird. Sie erstellt mehrere Teilfotos, welche dann zu einem großen Bild - dem Panorama - zusammengefügt werden. Die Schlitten bestehen aus einer Aluminiumplatte, auf welcher die Kamerahalterung, Riemenklammer sowie die Linearlager montiert sind. Die Grundstruktur der Schlitten ist identisch. Um den Fahrweg zu begrenzen, wurden an beiden Endpositionen Schalter verbaut, welche vor jeder Bewegung in der Firmware des verwendeten Mikrocontrollers überprüft werden. Um Kosten zu sparen, wurden viele Teile mithilfe des institutseigenen 3D-Druckers gefertigt. Für die Kamera wurde eine Halterung entworfen, die es ermöglicht, die Kamera in zwei Richtungen zu verschieben. Dadurch kann der Bildausschnitt optimal an die Probengeometrie angepasst werden. Neben der Halterung wurden auch Motorhalterung, Riemenklammer sowie beide Endschalterhalter im 3D-Druck Verfahren gefertigt. Als Führungsschienen kommen zwei Wellen mit 12 mm Durchmesser zum Einsatz. Die Wellenhalter sitzen auf Aluminiumprofilen, welche wiederum mit den Stehern der Prüfmaschine verbunden sind. Die Steuerung der Schrittmotoren und Beleuchtung übernimmt ein Arduino Mikrocontroller.

3.2 Beleuchtung

Um ein fehlerfreies Panorama zu erstellen sollten die Proben möglichst gleichmäßig ausgeleuchtet sein. Aus diesem Grund werden für die Beleuchtung mehrere Lampen verwendet. Es wird auf dem hinteren Schlitten stets eine Lampe auf Höhe der Kamera nachgeführt, um im Falle eines Risses diesen zu durchleuchten und damit gut sichtbar zu machen. Die Lampen auf der Vorderseite (Abbildung 12) sind drehbar ge-

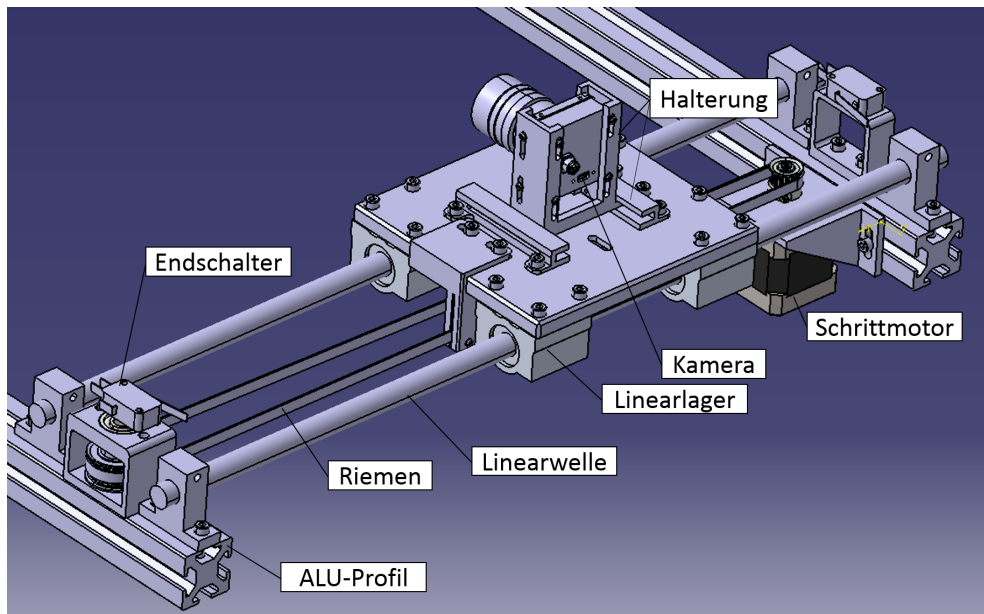


Abbildung 11: Optisches System - mechanischer Aufbau

lagert und an den beiden Enden der Kameraführung montiert. Durch die drehbare Lagerung kann der Lichtkegel an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden.

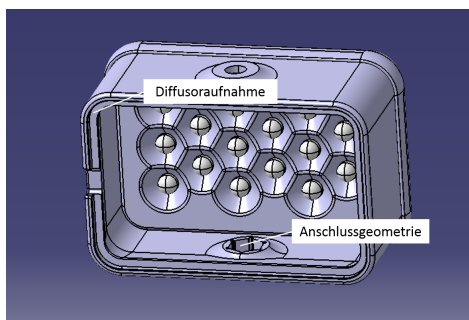


Abbildung 12: 3D-gedruckte Lampe

Die Lampen wurden am 3D-Drucker des Instituts ausgedruckt und selbstständig verlötet. Anstelle von Vorwiderständen für die Leuchtdioden wurde eine Konstantstromdiode verwendet. Die Ansteuerung der Lampen erfolgt durch den Arduino Mikrocontroller, wobei jede Lampe einzeln gesteuert werden kann. Die verwendeten Ausgänge des Arduino sind im Unterkapitel Elektronik beschrieben.

3.3 Elektronik

Den Kern der elektronischen Implementierung stellt der Arduino Uno dar. Er fungiert als Schnittstelle zwischen den Hardware-Elementen des Kamerasystems und der LabVIEW-Software. Der Mikrocontroller wurde gemeinsam mit den Schrittmotortreibern und Anschlussklemmen für Endstopps und Lampen auf einer Lochrasterplati-

ne im Inneren der Prüfmaschine montiert. Die Kommunikation mit LabVIEW erfolgt mit der LIFA-Software, welche auf dem Arduino als Firmware installiert ist. Für die Ansteuerung der Schrittmotoren ist im LIFA bereits eine Funktion vorgesehen. Diese Funktion führte jedoch anfänglich zu Problemen. Es wurde versucht, den Zustand der Endlagen mit LabVIEW vor jeder Bewegung der Schrittmotoren zu überprüfen. Dies führte jedoch zu einem langsamen Lauf der Schrittmotoren, da die LIFA-Paketfrequenz für diese Vorgehensweise zu gering ist. Um dieses Problem zu umgehen wurde die Firmware (Abbildung 13) abgeändert, sodass nun die Endlagen direkt in der Firmware abgetastet werden.

```
295 void AccelStepper::step1(uint8_t step)
296 {
297     if(_pin2 == 7 && _speed>0 && digitalRead(A0)==HIGH)
298     {
299         digitalWrite(_pin2, _speed > 0); // Direction
300         // Caution 200ns setup time
301         digitalWrite(_pin1, HIGH);
302         // Delay the minimum allowed pulse width
303         delayMicroseconds(_minPulseWidth);
304         digitalWrite(_pin1, LOW);
305     }
306     if(_pin2 == 7 && _speed<0 && digitalRead(A1)==HIGH)
307     {
308         digitalWrite(_pin2, _speed > 0); // Direction
309         // Caution 200ns setup time
310         digitalWrite(_pin1, HIGH);
311         // Delay the minimum allowed pulse width
312         delayMicroseconds(_minPulseWidth);
313         digitalWrite(_pin1, LOW);
314     }
315     if(_pin2 == 13 && _speed>0 && digitalRead(A2)==HIGH)
316     {
317         digitalWrite(_pin2, _speed > 0); // Direction
318         // Caution 200ns setup time
319         digitalWrite(_pin1, HIGH);
320         // Delay the minimum allowed pulse width
321         delayMicroseconds(_minPulseWidth);
322         digitalWrite(_pin1, LOW);
323     }
}
```

Abbildung 13: Accelstepper Step-Funktion mit Endschalter-Überprüfung

Schaltplan

Die Endlagen der Schlitten werden in den analogen Eingängen überprüft. Diese sind in dieser Anwendung jedoch als digitale Eingänge konfiguriert und damit werden die AD-Wandler der Eingänge nicht benutzt. Wie im Schaltplan (Abbildung 14) zu erkennen ist, sind die Eingänge standardmäßig mit einem Pullup-Widerstand versehen. Beim Erreichen der Endlage wird der entsprechende Eingang auf LOW gezogen und damit die nächste Bewegung des Schlittens in diese Richtung verhindert.

Im Schaltplan (Abbildung 14) ist auszugsweise die Beschaltung einer Lampe und eines Motors dargestellt. Die Beschaltung der anderen Lampen bzw. des anderen Motors ist identisch aufgebaut. Die Versorgung der Lampen und der Schrittmotoren erfolgt über dasselbe 12-Volt Netzteil. Die Dioden werden mithilfe eines NPN-Transistors durch den Arduino geschaltet. Anstelle eines Vorwiderstands für die Leuchtdioden wird eine Konstantstromdiode (CCD) verwendet, welche einen Strom von 25 mA liefert.

Die Pins MS1, MS2 und MS3 des Schrittmotortreibers sind mit Erde verbunden. Durch diese Beschaltung ist der Vollschritt-Modus des Treibers aktiviert. Für die Anwendung ist die Vollschritt-Variante vollkommen ausreichend, da keine genauere Positionierung der Kamera nötig ist. Um Überhitzung der Treiber zu verhindern werden diese durch Anheben des Signalpegels am EN-Pin nach dem Fotografieren der Probe und dem Zurückfahren des Schlittens zur Ausgangsposition abgeschaltet.

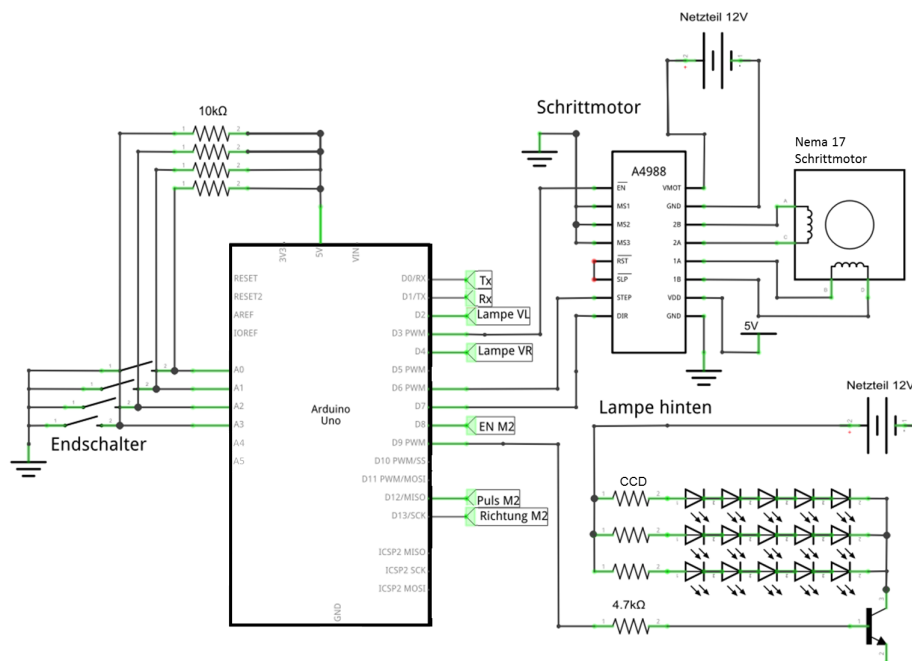


Abbildung 14: Beschaltung des Mikrocontrollers

Die Pinbelegung ist in Tabelle 3 auf Seite 54 übersichtlich dargestellt.

Schrittmotortreiber

Als Schrittmotortreiber verwendet das System den Pololu A4988 (Abbildung 15).



Abbildung 15: A4988

Der Pololu A4988 ist ein Schrittmotortreiber für bipolare Motoren, er ermöglicht neben der Vollschritt-Variante fünf verschiedene Mikroschritt-Betriebsarten. Der Spannungsbereich liegt zwischen 8 - 35 V, wobei der Strom 2 A per Phase nicht übersteigen soll. Eine wichtige Funktion dieses Boards ist die Strombegrenzung und der Übertemperaturschutz. Ein Austauschen der Schrittmotortreiber ist sehr einfach möglich, da die Treiber auf der Platine nur aufgesteckt sind.

4 Verwendete Software

In diesem Kapitel wird auf die Software eingegangen, die zur Realisierung des Systems benutzt wurde. Neben der Software wird das optische System beschrieben, das ebenfalls zur Bestimmung der Risswachstumskurven an einer zweiten Prüfmaschine am Institut verwendet wird und eine kommerzielle Lösung darstellt.

4.1 LabVIEW® Entwicklungsumgebung

LabVIEW® (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) ist eine Plattform und Entwicklungsumgebung für die grafische Programmiersprache G. Die Programmiersprache G wurde hauptsächlich für die Zusammenarbeit mit Messgeräten und anderen Laborgeräten entwickelt. LabVIEW® Programme werden als Virtual-Instrument (kurz VI) bezeichnet, da diese oft in Darstellung und Funktion einem Messgerät wie zum Beispiel einem Multimeter oder einem Oszilloskop sehr ähneln. Ein VI besteht aus der Benutzeroberfläche (Front-Panel), dem Blockdiagramm und dem Anschlussbrett. Eine Stärke von LabVIEW® ist das verhältnismäßig einfache Anbinden von Hardware verschiedenster Typen. Das Programm kommuniziert mit einer Vielzahl von Hardware über verschiedene Schnittstellen wie GPIB, PXI, RS-232 usw. Neben der Hardwareunterstützung bietet LabVIEW® auch die Möglichkeit Anwendungen mit einem Webserver zu verknüpfen oder mittels anderer Software Standards wie TCP/IP zu verwenden.

4.2 Vision Development Kit

Das Vision Development Module für LabVIEW wurde entwickelt, um Anwender beim Entwurf und Einsatz industrieller Bildverarbeitungsanwendungen zu unterstützen. Es enthält Funktionen für die Bilderfassung und unterstützt etliche Kameraschnittstellen.

4.3 LIFA

Das LIFA (LabVIEW Interface for Arduino) ist eine Toolbox, welche die Kommunikation mit dem Arduino Mikrocontroller erleichtert. Sie ermöglicht den Datenaustausch zwischen LabVIEW und Arduino. Neben der Firmware enthält das Softwarepaket VI's um die Funktionalität des Arduino vollständig abzudecken. Die Verwendung basiert auf einer ständigen Datenverbindung zwischen Computer und Arduino, welche meist

über USB, jedoch auch über Xbees oder Bluetooth, erfolgen kann. Die Schnittstelle sendet 15 Byte große Datenpakete an den Mikrocontroller, dieser verarbeitet sie und sendet Pakete zurück. Die Anzahl der zurückgeschickten Pakete hängt von dem gesendeten Befehl ab. Im Allgemeinen wird von jeder Anwendung mindestens ein Byte erwartet und das Programm pausiert, bis dieses ankommt. Diese Vorgehensweise stellt sicher, dass LabVIEW jederzeit mit dem Arduino synchronisiert ist. Die Struktur der Datenpakete ist in Abbildung 16 dargestellt.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Header	Command Byte	Data0	Data1	Data2	Data3	Data4	Data5	Data6	Data7	Data8	Data9	Data10	Data11	Checksum

Abbildung 16: Datenpaketstruktur LIFA

Die Übertragung von kompiliertem LabVIEW-Code auf den Arduino ist nicht möglich.

4.4 AutoStitch

Bei AutoStitch [15] handelt es sich um eine freie Panoramasoftware, die sich durch einfache Bedienung und einen robusten Algorithmus auszeichnet. Überlappende Bilder werden zu einem zusammenhängenden Bild verknüpft, wobei Helligkeitsunterschiede ausgeglichen werden. Es müssen nur wenige Parameter, wie Bildgröße, Format und Überblendungsmodus eingestellt werden. AutoStitch verfügt über keine API (Application programming Interface), was die Steuerung der Software über die Kommandozeile möglich machen würde. Dies erschwert die Implementierung in ein LabVIEW-Programm. AutoStitch wurde an der Canadian-University of British Columbia entwickelt, um den eigens entwickelten Algorithmus zu demonstrieren. Die verwendete Version ist nur als 64-Bit Variante verfügbar, was eine Systemumstellung von 32-Bit auf 64-Bit des Steuerungsrechners erforderte.

4.5 AutoHotKey

AutoHotkey [16] (kurz AHK) ist eine Skriptsprache, mit der sich die Windows-Benutzeroberfläche automatisiert steuern lässt. Die Skripte können in Executables kompiliert werden. In dieser Arbeit wird AutoHotkey verwendet, um die Abläufe von AutoStitch ohne Benutzereingaben zu automatisieren.

4.6 Fulla

Fulla [17] ist ein Kommandozeilen basierendes Programm, welches im bekannten Open-Source Softwarepaket Hugin enthalten ist. Fulla korrigiert chromatische Abweichung, Linsenverzeichnung und Vignettierung. In der erstellten Software wird Fulla verwendet um tonnenförmige Linsenverzeichnung zu korrigieren.

4.7 Mogrify

Mit Mogrify [18] können Bilder einfach über die Kommandozeile bearbeitet werden. Das Programm beinhaltet eine breite Palette von Funktionen. Die Kommandozeilenbefehle sind auf der Webseite zugänglich. Mogrify ist im Image-Magick Softwarepaket enthalten.

4.8 Kommerzielle Realisierungen optischer Systeme

Die Betrachtung der kommerziellen Produkte (Abbildung 17) zeigt eine breite Palette von berührungsfreien optischen Systemen. Wichtige Vertreter sind die Produkte der Firmen Keyence [19] und LaVision [20], wobei bei diesen Produkten verschiedenste Messmethoden und Algorithmen zum Einsatz kommen. Es ist festzuhalten, dass die kommerziellen Lösungen meist sehr kostenintensiv sind und auch mit Herstellersoftware arbeiten. Deshalb können sie nur schwer in ein bestehendes System integriert werden. Eine durchaus interessante Methode benutzt die Software der Firma LaVision.



Abbildung 17: LaVision Strainmaster [20]

Sie arbeitet mit der digitalen Bildkorrelation (Abbildung 18), welche die Bewegung von Oberflächenstrukturen verfolgt. Dadurch kann auf das Verformungsfeld geschlossen werden. Aus diesem kann mithilfe der Materialgleichungen das Spannungsfeld bestimmt werden. Durch die Verwendung mehrerer Kameras können 3D-Bilder erzeugt werden und damit Verschiebungen und Dehnungen von beliebigen Objektgeometrien eruiert werden. Wichtig bei dem Verfahren

ist die Oberflächenstruktur, welche möglichst viele unterscheidbare Elemente auf-

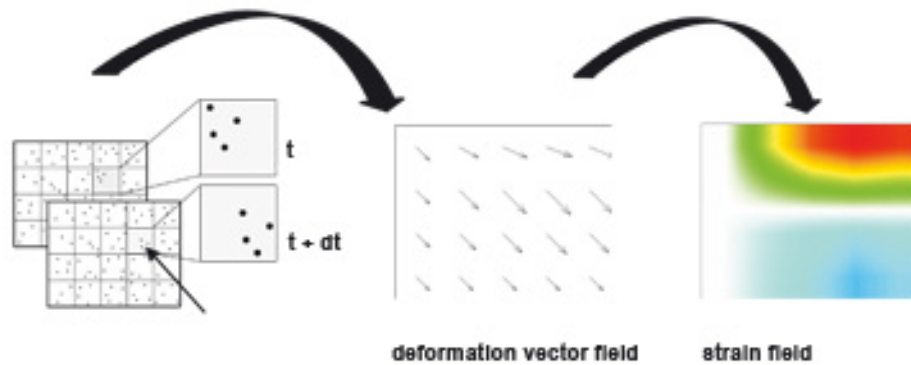


Abbildung 18: digitale Bildkorrelation

weisen sollte um von der Software fehlerfrei verarbeitet zu werden. Nach dem gleichen Prinzip kann mithilfe von Hochgeschwindigkeitskameras, deren Bildfrequenzen im Kilohertz-Bereich arbeiten, der Verlauf von Risskanten verfolgt werden.

Keyence System

Am Institut wird eine zweite Prüfmaschine für dynamische Tests verwendet, die mit einem kommerziellen optischen System von Keyence ausgestattet ist. Dieses besteht aus einer Keyence CV-5001 Auswerteeinheit (Abbildung 19) und einer fünf Megapixel CCD-Kamera.



Die Bildverarbeitung erfolgt direkt auf dem CV-5001, somit ist zur Bildanalyse kein weiterer Rechner notwendig. Man kann die Analyse über einen externen Bildschirm überwachen und steuern. Die Bedienung des Systems erfolgt mit einer Fernbedienung. Es verfügt über zwei Speicherkarten, wobei auf einer Karte die Programme der Bildverarbeitung abgelegt werden. Diese ist fest in das System integriert und sollte nicht entfernt werden. Auf der zweiten Karte können ebenfalls Programme abgelegt werden, aber auch Bilder aus dem laufenden Betrieb;

Abbildung 19: Keyence CV-5001 Auswerteeinheit

sie darf entfernt werden. Die Auswerteeinheit verfügt zusätzlich über digitale Ein- und Ausgänge, mit welchen Bildaufnahmen ausgelöst, Variablen ausgegebenen oder Beleuchtungseinheiten aktiviert werden können. Das System verfügt über eine RS232-Schnittstelle, welche zur Konfiguration der Einheit verwendet werden kann. Zur Übertragung der Bilder kann auf die USB- und Ethernet-Verbindung zurückgegriffen werden. Die Auswertesoftware verfügt über eine Vielzahl von Filtern und anderen Optimierungstools. Es lassen sich neben der Kantenerkennung auch Funktionen wie Farberkennung, Texterkennung oder Vermessungen durchführen. Eine weitere wichtige Funktion ist das Positionieren eines Messfensters anhand von Messwerten anderer Bildverarbeitungsfunktionen. Diese Funktion ermöglicht das Überwachen eines Bereichs, dessen Position sich durch Belastungsverhältnisse oder einen Riss ändert.

5 Programmierung der Schnittstelle

In diesem Kapitel wird zunächst die Programmierung und Struktur des Interpreters beschrieben. Er stellt das Bindeglied zwischen Anweisungsliste und Hardware dar. Neben den im Folgenden beschriebenen Programmteilen wurden noch wesentlich mehr Softwarebestandteile erstellt, welche unter anderem der Überwachung des Prüfablaufs dienen. Auf diese wird aber aus Übersichtsgründen nicht weiter eingegangen.

5.1 Hauptprogramm

Bevor eine Messung gestartet werden kann ist es nötig die Maschine einzurichten (orange Markierung - Abbildung 20). Im Unterprogramm muss der Nullpunkt (Offset) der jeweiligen Messung festgelegt werden. Relativ zu diesem Punkt werden die Kurven gefahren.

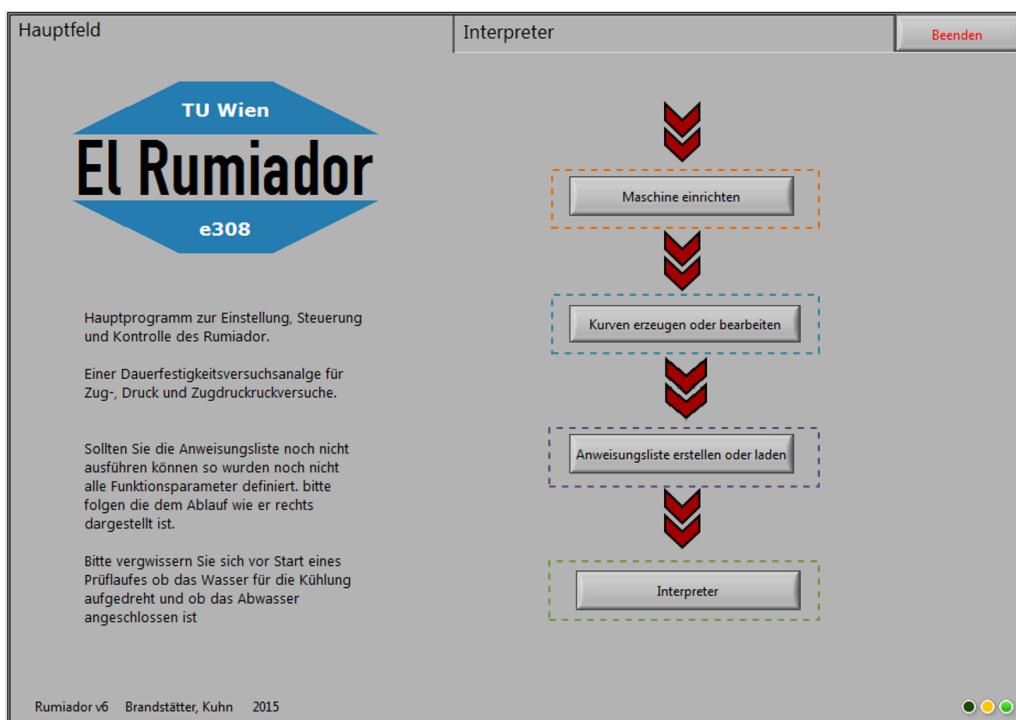


Abbildung 20: Front-Panel des Hauptprogramms

Im Unterprogramm - Kurven erzeugen (blaue Markierung) - können Kurven definiert werden. Sie werden anschließend in Anweisungslisten in Kombination mit anderen Be-

fehlen verwendet (violette Markierung). Ist die Vorbereitung, abgeschlossen kann der Interpreter gestartet werden (grüne Markierung). Mit dem Interpreter wird eine zuvor erstellte Anweisungsliste ausgewählt und abgearbeitet. Somit erfolgt die dynamische Prüfung erst in diesem Abschnitt des Programms.

5.2 Anweisungsliste und Interpreter

Die Anweisungsliste besteht aus einer zeilenweisen Aneinanderreihung von Befehlen. Sie wird vor dem Prüflauf definiert (violette Markierung - Abbildung 20) und kann, einmal abgelegt, immer wieder verwendet werden. Es stehen verschiedene Befehle zur Auswahl. Im Beispiel in Abbildung 21 wird zunächst die Kurve mit der ID-1, 4000-mal gefahren. Anschließend wird die Probe auf 9 mm (Zug) vorgespannt und Fotos erstellt. Diese zwei Schritte werden dann 1250-mal wiederholt, was einer Gesamtzyklenzahl von 5000000 entspricht. Die Anzahl der Unterbrechungen ist abhängig von der Probenzusammensetzung und der zu erwartenden Lebensdauer. Die Datenstruktur der

The image shows a screenshot of a software interface for defining a list of instructions. It consists of three rows, each representing a different instruction type. Each row has a 'Zeile Nr.' (Line No.) field, a 'Fall' (Case) dropdown menu, and several other control fields. An orange arrow points from the text 'Fallunterscheidung' to the 'Fall' dropdown menu in the second row.

Zeile Nr. 2	Fall 2	Kurven ID 2	Ausführen bis: 2	Zyklen [1] 2
1	Kurve	1	n Durchläufe	4000
Zeile Nr. 3	Fall 3	Vorspannen auf 3		
2	Fotostopp	-9		
Zeile Nr. 4	Fall 4	Gehe zu Zeile: 4	Anzahl Wiederholungen 4	
3	Zeilensprung	1	1250	

Abbildung 21: Anweisungsliste mit Fotostopp und Sprunganweisung

Anweisungsliste ist in Abbildung 22 dargestellt. Wichtig für die spätere Abarbeitung im Interpreter ist die Fallunterscheidung (Dropdown-Menü Abbildung 21). Jeder Fall verlangt die Eingabe von verschiedenen Parametern bzw. das Ausführen von verschiedenen Funktionen. Durch die Auswahl eines Falls im Dropdown-Menü wird die jeweilige Fall-ID an die erste Stelle des Arrays geschrieben und der Interpreter kann anhand dieser unterscheiden, welche Funktionen ausgeführt werden, bzw. welche Elemente des Arrays für den Fall relevant sind.

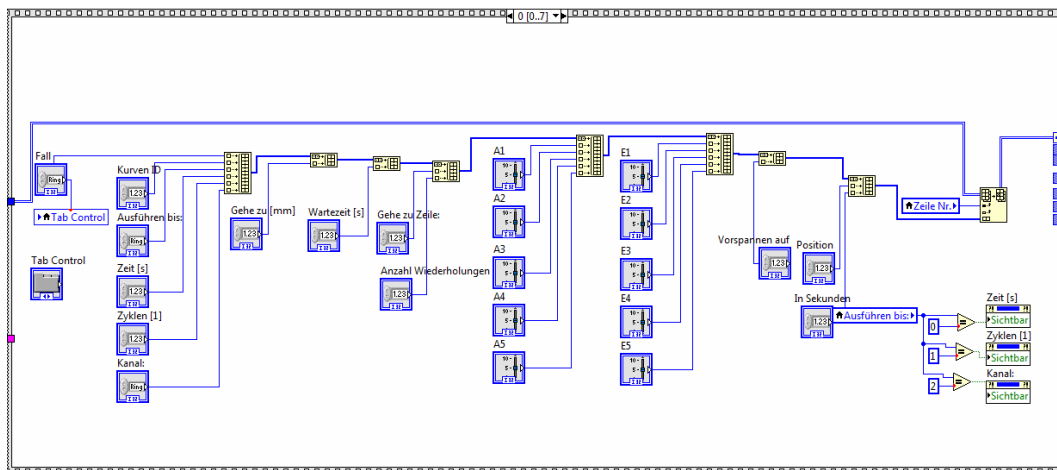


Abbildung 22: Datenstruktur - Zeile einer AWL

5.3 Abarbeitung/Fallunterscheidung der Anweisungsliste

In den folgenden Unterkapiteln wird auf die Fallunterscheidung der Anweisungsliste eingegangen. Es werden nur die Teile des Blockdiagramms beschrieben, welche für das Verständnis der jeweiligen Funktion wichtig sind. Wichtige Grundlage für das Verständnis der Motorsteuerung ist die Funktionsweise des verwendeten Linearmotors bzw. die Funktion des Command-Table. Dies kann im Manual des Motors nachgelesen werden. Die Funktionen werden in dieser Arbeit nicht näher beschrieben, da dies den Rahmen sprengen würde.

5.3.1 Kurve fahren - Fall 1

Zu Beginn dieses Falls wird die ID der zu fahrenden Kurve aus der Anweisungsliste geladen und diese dann in die Command-Table des Linearmotors eingetragen. Dies geschieht mit dem Befehl: Mod16BitCTParameter. Neben der bereits genannten Funktion ist in der Abbildung 23 auch der Befehlsblock, welcher zum Starten des Prüfvorgangs, bzw. zum Starten des Command-Table Eintrags notwendig ist, dargestellt.

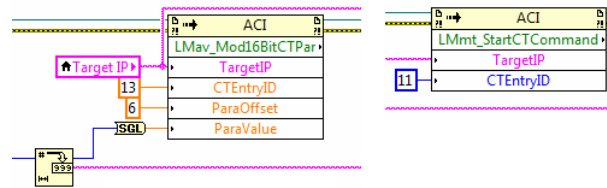


Abbildung 23: Kurven-ID eintragen und Command-Table Start

In Abbildung 24 ist ein Ausschnitt der Benutzeroberfläche beim Erstellen der Anweisungsliste dargestellt. Die für die Anweisungsliste verwendeten Kurven werden zunächst geladen (orange Markierung). Sie können anschließend mit der angeführten Kurven-ID (blaue Markierung) in der Anweisungsliste verwendet werden. Um Fehler zu vermeiden, wird die zuletzt geladene Kurve dargestellt (grüne Markierung).

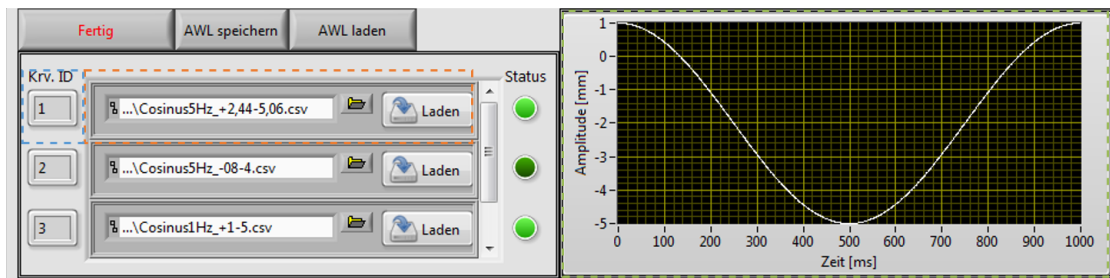


Abbildung 24: Kurve wählen - Anweisungsliste

Da die Möglichkeit besteht, eine Kurve zu definieren, die nicht von der Anfangslage des Rumiadors startet (Abbildung 25), ist es nötig den Offset der Kurve zu berücksichtigen. Dies geschieht automatisch und muss daher vom Benutzer nicht beachtet werden.

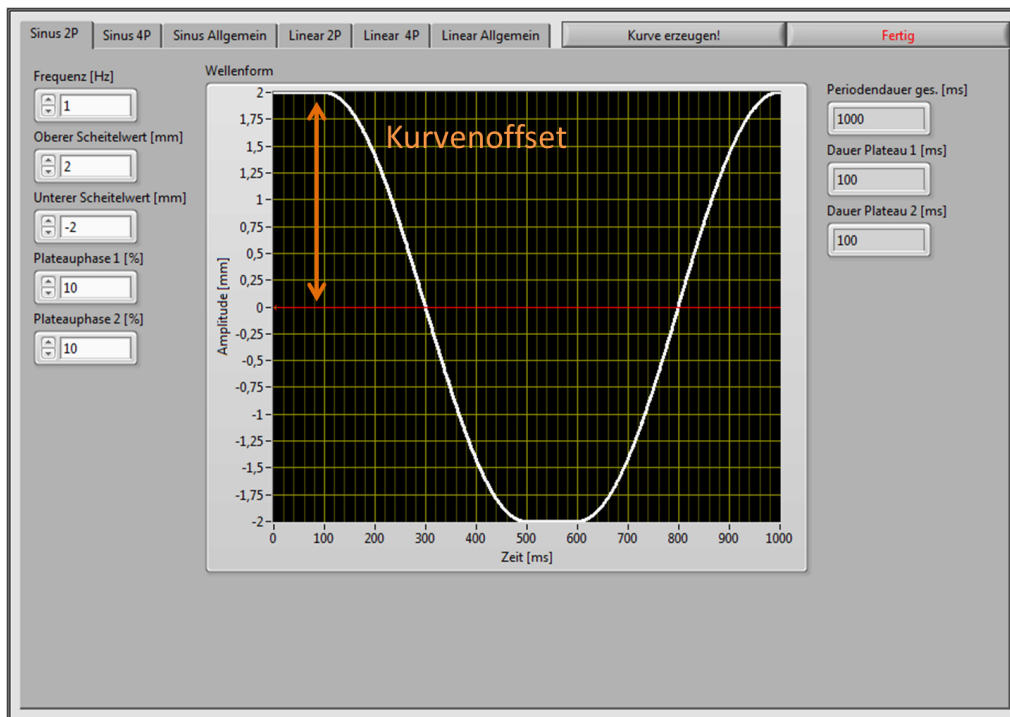


Abbildung 25: Kurve mit 2 mm Offset

Auch wenn die Abweichung der Kurve nur wenige zehntel Millimeter beträgt, kommt es durch die erhebliche Beschleunigung des Läufers zu hörbaren Schlägen sowie starkem Überschwingen in diesen Bereichen. Durch Anfahren der Offsetposition (Abbildung 26) wird der Läufer zur richtigen Ausgangsposition bewegt und damit ein stoßfreies Anfahren ermöglicht.

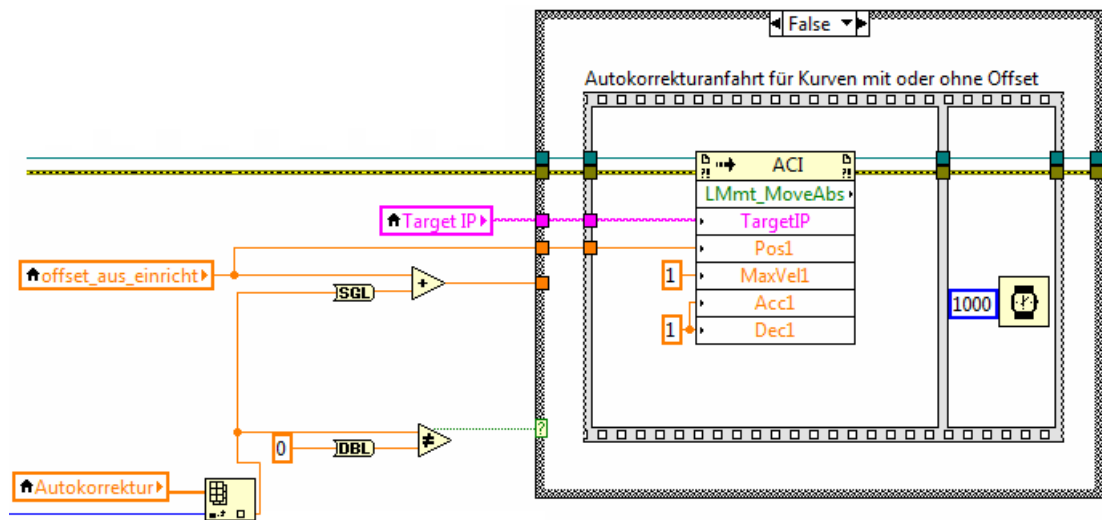


Abbildung 26: Korrektur des Kurvenoffsets

Die Werte der Offsets werden beim Erstellen der Anweisungsliste in ein zusätzliches Array geschrieben. Bei einem Neustart des Hauptprogramms ist es wichtig, die Anweisungsliste mit den dazugehörigen Kurven erneut zu laden.

Kriterien zum Beenden der Kurvenfahrt

Da es möglich ist, verschiedene Methoden zum Beenden der Kurvenfahrt zu wählen, ist auch hier eine Fallunterscheidung notwendig. Der meistgenutzte Fall beim Prüfen von Elastomeren ist das Beenden nach einer definierten Zyklenzahl (Abbildung 27).

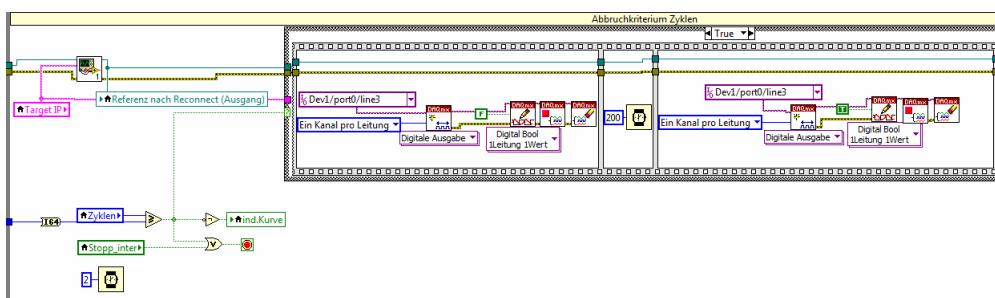


Abbildung 27: Abbruchkriterium nach Zyklenzahl

Beim Erreichen der Grenzyklenzahl, welche aus der Anweisungsliste gelesen wird, wird mithilfe des NI-DAQmx-Geräts ein Eingang am Treiber des Antriebsmotors auf LOW gezogen. Dieser Eingang wird während des Prüflaufs im Command-Table (Abbildung 28 - blaue Markierung) ständig überprüft. Wird der in der Command-Table festgelegte Grenzwert des Eingangssignals unterschritten, wird der Antriebsmotor in den Wartezustand versetzt und somit die Kurvenfahrt beendet.

	Bezeichnung	Befehl	Parameter			Folgezeile	
8	glob_count_set	Set Cmd Table Var 2 To	Set Val: 0			None	
9							
10							
Startpunkt Kurvenfahrt							
11	einfaedel	Wait until Motion Finished				12 (variable_null)	
12	variable_null	Set Cmd Table Var 1 To	Set Val: 0			13 (fahr_kurve)	
13	fahr_kurve	Time Curve With Adjustable Diff...	Curve: 1	Offs: 39.3151 mm	Time: 100 %	Amp: 100 %	14 (addiere)
14	addiere	Add To Cmd Table Var 1	Add Val: 1				15 (glob_count_)
15	glob_count_add	Add To Cmd Table Var 2	Add Val: 1				16 (warten)
16	warten	Wait until Motion Finished					17 (Ausstieg)
17	Ausstieg	IF Analog Val Dn X4.4 Less Than	Val: 9.999...	True Cmd ID: 26 (X4.3...	False Cmd ID: 27 ...		None
18							
19							
20	warten	Wait until Motion Finished					21 (löscht)
21	löscht	Set Cmd Table Var 1 To	Set Val: 0				None
22							
23							
24	glob_counter_del	Set Cmd Table Var 2 To	Set Val: 0				None
25							
Kühlwasserventil							
26	X4.3 LOW	Write X4 Intf Outputs with Mask	X4 Write B...	X4 Write Bit Values: 0...			20 (warten)
27	X4.3 HIGH	Write X4 Intf Outputs with Mask	X4 Write B...	X4 Write Bit Values: 0...			13 (fahr_kurve)

Abbildung 28: Struktur des Command-Tables in Drive

Neben dieser Art die Kurvenfahrt zu beenden gibt es noch die Möglichkeiten nach einer bestimmten Zeit (angegeben in Sekunden), sowie bei einer bestimmten Beschaltung der fünf digitalen Eingänge den Ablauf zu stoppen.

Eine weitere wichtige Funktion des Command-Table ist es die Kühlung des Linearmotors zu steuern. Die Kühlung des Stators erfolgt über ein Wasserventil, welches auch über den Command-Table geschaltet wird. Zu Beginn der Arbeit wurde das Kühlwasser noch durch ein Thermostat gesteuert. Es traten im Betrieb jedoch ständig Probleme auf, was eine neue Lösung nötig machte. Durch die Steuerung des Hauptventils direkt über den Treiber des Antriebsmotors, ist die Kühlung von LabVIEW entkoppelt und daher auch im Falle eines Programmabsturzes gewährleistet. In Zeile 17 (Abbildung 28) wird überprüft ob der Motor eine Bewegung ausführt. Ist dies der Fall, wird der digitale Ausgang drei des Drive geschaltet (Zeile 27) und damit das Kühlwasserventil geöffnet.

5.3.2 Position anfahren - Fall 2

Beim Einrichten der Maschine vor einem Prüfvorgang wird die Probe meist im spannungsfreien Zustand eingespannt. Die Position der Backe wird als neuer Nullpunkt definiert. Im Fall Position anfahren wird dem Prüfgerät mithilfe des Befehls - LMmt_MoveAbs - mitgeteilt, zu welcher Position gefahren werden soll. Die Geschwindigkeit und Beschleunigung der Bewegung ist, wie im Blockdiagramm ersichtlich, fest vorgegeben. Der Nullpunkt wird zur gewünschten Position hinzuaddiert (siehe Abbildung 29) - die Positionsänderung geschieht somit immer ausgehend vom Nullpunkt.

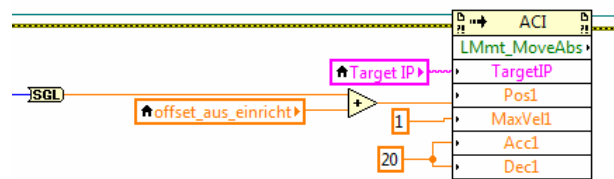


Abbildung 29: Fall 2 - Position anfahren

5.3.3 Wartezeit - Fall 3

In diesem Fall wird der Prüflauf für eine definierte Zeit pausiert. Dies geschieht mit einer Warteschleife, die wiederholt wird, bis die Sekundenanzahl erreicht ist.

5.3.4 Sprunganweisung - Fall 4

Bei Umwandeln der Liste wird jede Zeile des Eingabearrays eingelesen und geprüft, ob diese einen Sprungbefehl enthält (Abbildung 30). Ist kein Sprungbefehl vorhanden, wird sie lediglich an das Ausgabearray angehängt. Enthält sie einen Sprungbefehl, wird die Anzahl der Wiederholungen und die Zeile, an welche gesprungen werden soll, gelesen. Mit dieser Information wird in den innersten zwei Schleifen mithilfe eines Schieberegisters die Wiederholung ausgeführt und schließlich ebenfalls an das Array angehängt. Das resultierende Array kann nun durch den Interpreter Zeile für Zeile abgearbeitet werden. Es ist zu beachten, dass die Erzeugung des Arrays aufgrund der Länge durchaus einige Sekunden in Anspruch nehmen kann.

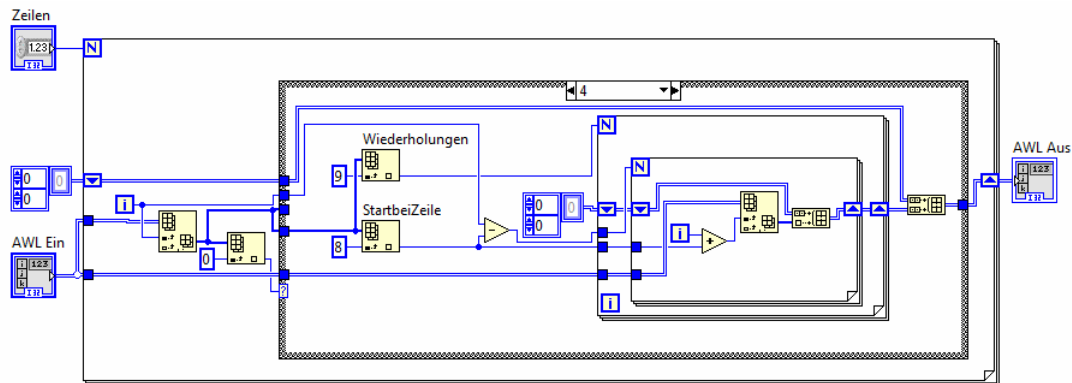


Abbildung 30: Verarbeitung eines Sprungbefehls

5.3.5 Ausgänge - Fall 5

Die Prüfmaschine verfügt über fünf digitale Ausgänge, welche über das NI-DAQmx geschaltet werden. Um die Zustände zu schalten, müssen diese aus dem Binärsystem in das Dezimalsystem umgewandelt werden. Diese Dezimalzahl wird dann an das NI-DAQmx weitergegeben und damit die Ausgänge gesetzt. Die Berechnung und Weitergabe der Daten ist in Abbildung 31 dargestellt.

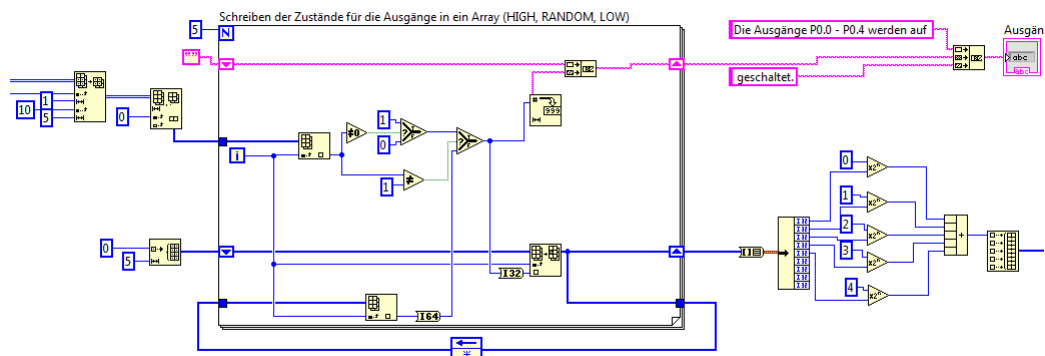


Abbildung 31: Fall 5 - Ausgänge schalten

5.3.6 Eingänge - Fall 6

Diese Funktion ermöglicht es, die Maschine zu stoppen, bis ein definiertes Eingangssignal an den Eingängen anliegt. Hierzu werden zunächst alle Anschlüsse eingelesen, diese Werte werden dann mit den Sollwerten in der Anweisungsliste verglichen. Stim-

men sie überein, gilt der Fall als beendet und der Interpreter beginnt mit dem Abarbeiten der nächsten Zeile. Das Einlesen wird wiederholt, bis an den Eingängen die gewünschten Signale anliegen.

5.3.7 Fotostopp - Fall 7

Da dieser Fall mit dem LIFA zusammenarbeitet ist es nötig, den Arduino zu initialisieren.

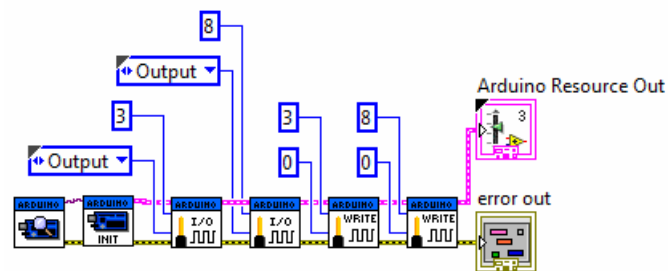


Abbildung 32: Initialisierung des Arduino

Neben der Initialisierung (Abbildung 32) werden auch zwei Ausgänge als Outputs definiert und auf logisch LOW gezogen. Die Ausgänge sind mit den Schrittmotorentreibern verschaltet - sie werden aktiviert. Die Motoren werden mit Strom durchflossen, resultierend baut sich das Haltemoment auf. Nachdem die Schrittmotoren aktiviert sind, wird das Referenzieren der Motoren ausgeführt. Bei dem Fall Fotostopp kann im Feld - Vorspannen auf - eingegeben werden, unter welcher Auslenkung ausgehend vom Nullpunkt die Fotos gemacht werden. Die Anzahl der Fotos hängt von der Länge der Proben ab. Die Befehle zur Fotoerstellung inklusive Verfahren des Schlittens sind in Abbildung 33 dargestellt. Sie beginnen mit der Anzahl der bereits gefahrenen Zyklen (orange). Dann folgt die Auslenkung unter der die Fotos gemacht werden (blau) und eine fortlaufende Zahl (grün), die die Einzelbilder unterscheidet. Für das Fotografieren werden die Positionen der Proben in den Halterungen benötigt. Diese werden im Sub-VI - Fotostoppeinrichten.vi Abbildung 35 - vor dem Start des Prüflaufs definiert. Das VI kann in der Interpreter Benutzeroberfläche des Hauptprogramms aufgerufen werden. Das VI ist in Kapitel 5.4 genauer beschrieben. Nachdem die erste Fotoposition erreicht ist, werden die Proben auf den vorgegebenen Wert vorgespannt.

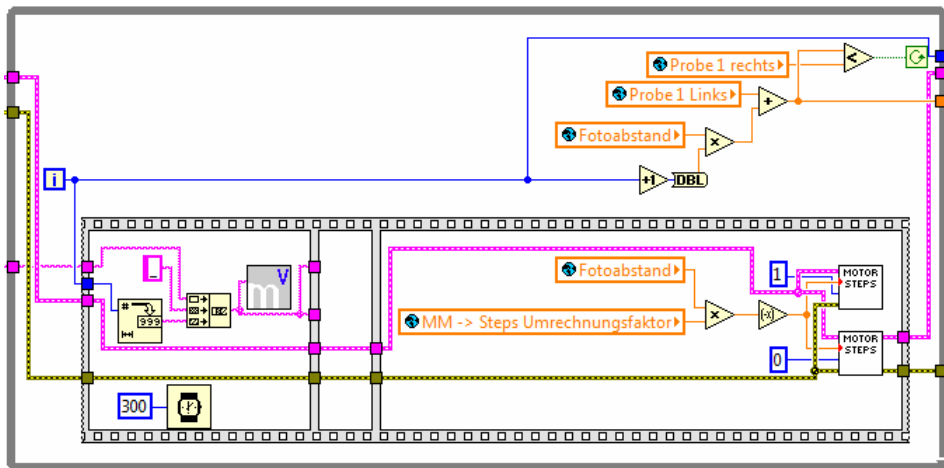


Abbildung 33: Fotoerstellen mit Schlittenfahrt

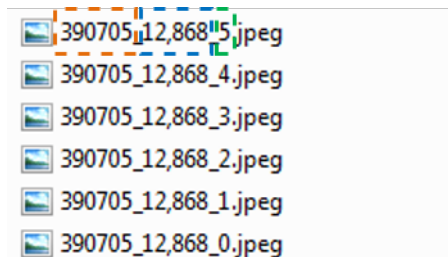


Abbildung 34: Dateistruktur der Fotos

Wenn die Proben kurz genug sind, können auch zwei Proben gleichzeitig geprüft werden. Dann müssen im SubVI FotostoppEinrichten.vi (Kapitel 5.4) auch die Grenzen der zweiten Probe definiert. Die Verarbeitung im Fall Fotostopp erfolgt analog zur ersten Probe.

5.3.8 Rampe - Fall 8

Dieser Fall ähnelt sehr dem Fall 2 (Position anfahren), wobei neben der Position noch angegeben werden kann, mit welcher Geschwindigkeit diese angefahren werden soll.

5.4 Einstellung der Fotoerstellung

Wichtig bei der Fotoerstellung ist die gute Positionierung der Kamera. Diese Positionierung muss vor dem Prüflauf mit dem SubVI - FotostoppEinrichten.vi Abbildung

35 - vorgenommen werden. Das SubVI kann in der Registerkarte - Interpreter - des Hauptprogramms aufgerufen werden. Zu Beginn können die Lampen mit - Lampen Ein - eingeschaltet werden. Anschließend muss das Homing im Kontrollfeld (orange Markierung) ausgeführt werden, um die Motoren in eine definierte Lage zu bringen. Anschließend wird mit dem Bewegungsfeld (grüne Markierung) die Probe angefahren. Im Kamerabild sind zwei vertikale Hilfslinien eingeblendet. Die Hilfslinien dienen der korrekten Positionierung. Die linke vertikale Linie sollte mit der linken Probenkante zusammenfallen. Ist dies der Fall, kann der Punkt gespeichert werden. Das Abspeichern der Probenkante erfolgt mit - Probe 1 links merken (blaue Markierung). Das gilt auch für die rechte Hilfslinie und die rechte Probenkante. Analog dazu geschieht das Einrichten der zweiten Probe. Das Unterprogramm kann nach Abschluss des Einrichtens mit - Einrichten abgeschlossen - beendet werden.

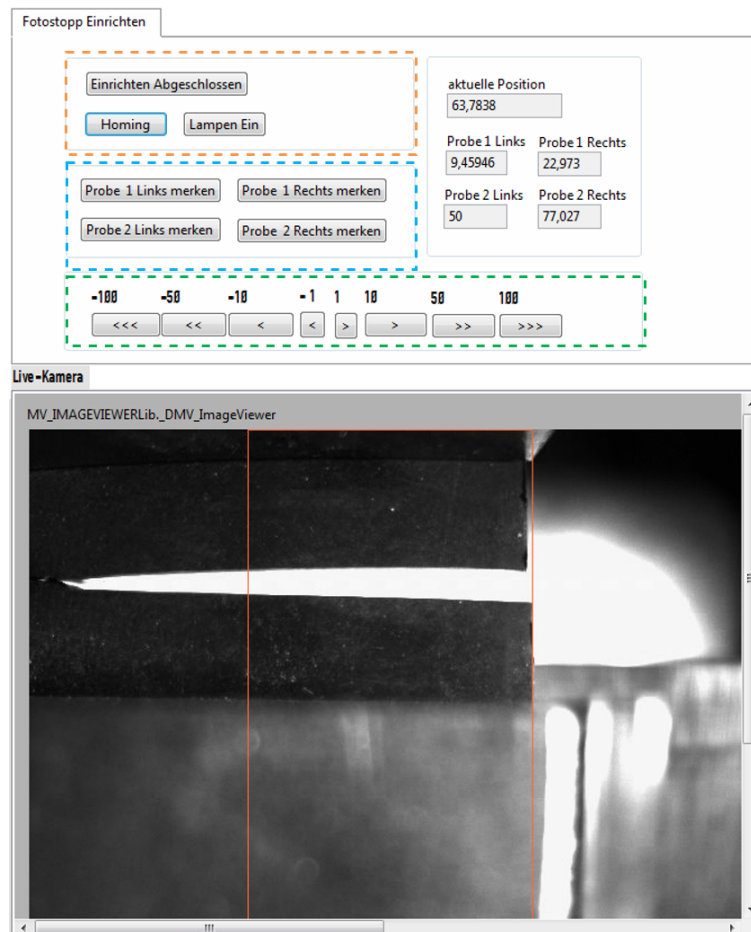


Abbildung 35: Fotostopp einrichten

Es gibt die Möglichkeit die Einstellungen der Fotoerstellung zu verändern. Einige Einstellungen sind direkt im Interpreter zugänglich und können während des Prüfvorgangs verändert werden. Andere müssen im SubVI - Globale_Variablen.vi - definiert werden: JPEG-Qualität, Belichtungszeit, Fotoabstand und Umrechnungsfaktor. Das VI - Globale-Variablen.vi - befindet sich im Hauptordner der LabVIEW Anwendung. Nach einigen Tests mit verschiedenen Bildqualitäten haben wir die JPEG Qualität 90 als ausreichend festgelegt. Diese stellt einen guten Kompromiss von Bildqualität und Speicherbedarf dar.

Die Belichtungszeit führt, unter Verwendung des aktuellen Beleuchtungskonzepts, mit einem Wert von $5500 \mu\text{s}$ zu guten Ergebnissen. Dieser Wert ist bei Umbau oder Änderung der Beleuchtungsverhältnisse anzupassen.

Der Fotoabstand legt die Anzahl der Schritte fest, welche zwischen den einzelnen Fotos gemacht werden. Nach einigen Tests wurde hierfür 15 gewählt, da dies bei derzeitigem Kameraabstand zu den besten Ergebnissen führte. Dieser Wert entspricht einer Bildüberdeckung von ca. 60 %

Eine weitere wichtige Größe ist der Umrechnungsfaktor, mit welchem die Anzahl der Schritte des Schrittmotors in zurückgelegten Weg des Schlittens umgerechnet wird. Der Schrittwinkel der verwendeten Schrittmotoren beträgt 1,8 Grad, somit 200 Schritte bei einer Umdrehung. Das Riemenrad hat einen Wirkdurchmesser von 17,51 mm. Nach einfacher Rechnung ergibt sich eine Verschiebung des Schlittens von 0,27 mm pro Schritt und folglich ein Umrechnungsfaktor von ca. 3,7 für das verwendete Riemenrad.

6 Programmierung und Ablauf der Analysesoftware

Nach Beenden des Prüflaufs kann nun die Analyse der Bilder vorgenommen werden. Diese wird im Folgenden beschrieben, wobei neben dem Ablauf auch die Programmstruktur erklärt wird.

Die Analyse der Bilder erfolgt mit dem von der Prüfmaschinensteuerung entkoppelten Programm - Rissanalyse.vi . Die Proben werden getrennt voneinander analysiert. Der Ablauf ist wie folgt festgelegt:

- Erstellung von Panoramen aus Serienbildern
- Vermessung der Panoramen
- Ausgabe der wichtigen Rissgrößen
- Erstellung von Fortschrittsbildern

6.1 Panoramaerstellung

In Abbildung 36 ist die Benutzeroberfläche des Analyseprogramms dargestellt. Zunächst muss dem Programm mitgeteilt werden, in welchem Ordner (orange Markierung) sich die Serienbilder befinden. Ebenso muss der Bereich (blaue Markierung), in welchem sich der Riss gebildet hat bzw. die Ausbreitung gemessen werden soll, angegeben werden. Die entsprechenden Werte sind in die Felder Startzyklus und Endzyklus einzutragen. Da eine Probe aus mehreren Bildern besteht, ist auch der Bereich anzugeben, welcher die Bilder, in denen die Probe zu sehen ist, umfasst. Diese Werte sind in die Felder StartIndex und EndIndex einzutragen. Neben diesen Einstellungen ist dem Programm ebenfalls mitzuteilen, in welchem Ordner die fertiggestellten Panoramen abgelegt werden sollen (grüne Markierung). Der Dateiname des resultierenden Panoramas entspricht dem Zyklus, bei dem die Serienbilder gemacht wurden. Achtung: Bestehende Panoramen mit gleichem Namen werden überschrieben.

6.1.1 Funktion - Bilder suchen

Die Funktion - Bilder suchen in Abbildung 36 - sucht zunächst alle Bilderserien im angegebenen Ordner. Bilder einer Serie werden in ein eindimensionales String-Array gespeichert. Die gefundenen Bilderserien werden nun in der Liste angezeigt. Ist die

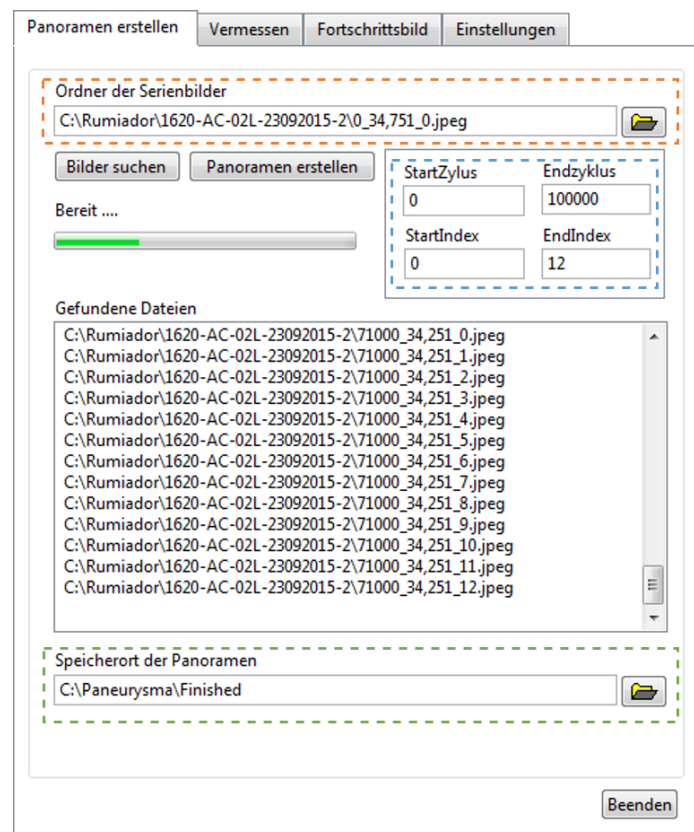


Abbildung 36: Benutzeroberfläche Rissanalyse.vi

Suche fehlerfrei abgelaufen, sollten nun die Serienbilderpakete durch eine leere Zeile voneinander getrennt (Abbildung 36 - rote Markierung) dargestellt sein.

6.1.2 Funktion - Panoramen erstellen

Die Funktion - Panoramen erstellen in Abbildung 36 - dient der Vorbereitung der Bilder sowie der Erstellung der Panoramen. Bevor die Panoramen mit der Software Auto-Stitch erstellt werden, sind folgende Operationen an den Bildern durchzuführen.

- Entzerrung der Bilder
- Drehen der Bilder
- Entfernen der Ränder

Zunächst werden die aktuellen Bilder einer Serie in den temporären Ordner der Panoramaverarbeitung kopiert. Dies ist nötig, da die Verarbeitung der Bilder von Batch-Skripten gesteuert wird und diese auf alle Dateien in einem Ordner angewendet werden. In analoger Weise ist auch das Drehen und Entfernen der Ränder implementiert worden.

Die tonnenförmige Verzerrung der Bilder entsteht durch die Positionierung der Kamera. Diese wird, um hochauflösende Bilder zu erzeugen, sehr nahe an den Proben positioniert. Durch die Objektivkrümmung kommt es zur Verzerrung in den Randbereichen der Bilder (siehe Abbildung 37).

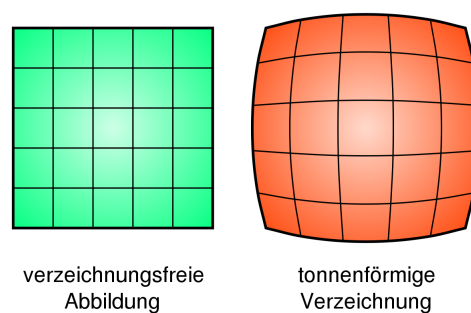


Abbildung 37: tonnenförmige Verzerrung [21]

Die Korrektur der Verzerrung wird mit Fulla durchgeführt. Ein typischer Aufruf zur Verarbeitung aller Bilder eines Ordners ist in Abbildung 38 dargestellt.

```
1 FOR %%f IN ("C:\Paneurysma\Temp\*.jpeg") DO (  
2 "C:\Program Files\Hugin\bin\fulla" -g -14.2:-14.2:-14.2:-14.2 "%%f"  
3 del "%%f"  
4 )
```

Abbildung 38: Batch Skript - Entzerren

Die Parameter der Entzerrung wurden mit GIMP anhand einer Referenzprobe gemessen. Die Parameter beschreiben die radialen Verzerrungskoeffizienten der vier Kanäle. Genauere Informationen sind bei [17] zu finden. Im Anschluss werden die Bilder mit Mogrify gedreht, um zu gewährleisten, dass die obere Backe der Prüfmaschine horizontal ist.

Bei der Entzerrung der Bilder entstehen schwarze Ränder, welche sich negativ auf die Genauigkeit der Panoramaerstellung auswirken. Diese werden im nächsten Schritt entfernt (Abbildung 39).

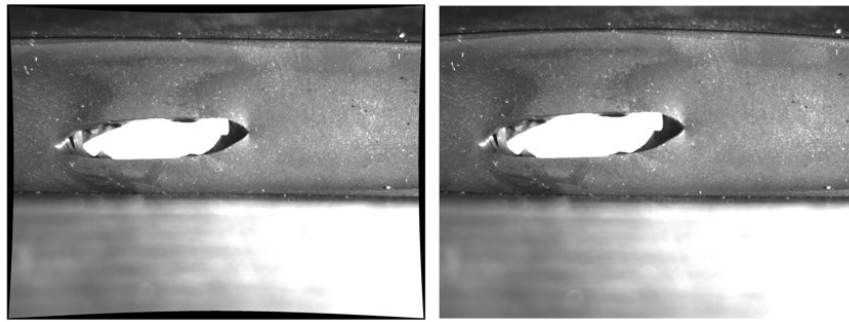


Abbildung 39: Ränderentstehung durch Korrektur (rechts ist das originale Bild zu sehen, links das korrigierte Bild)

Abschließend werden nun die Panoramen erzeugt. Die Panoramaerstellung (Abbildung 40) wird durch ein AutoHotKey-Skript gesteuert und erfolgt idealerweise ohne Benutzereingaben. Die Panoramaerzeugung nimmt abhängig von der Fotoseriengröße etwas Zeit in Anspruch. Vor dem Vermessen der Panoramen ist es wichtig die Panoramen zu überprüfen, da es vereinzelt zu Verschneidungsfehlern kommen kann, was die weitere Verarbeitung der Panoramen stört. Fehlerhafte Panoramen müssen gelöscht werden, um den reibungslosen Ablauf der weiteren Analyse zu gewährleisten.

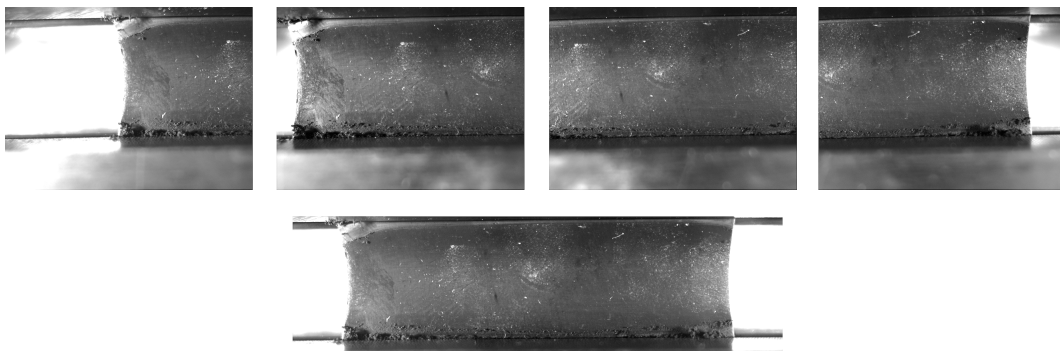


Abbildung 40: Erzeugung eines Panoramas

6.2 Vermessen

Das Vermessen kann eigenständig erfolgen und muss daher nicht sequenziell nach dem Erstellen der Panoramen ausgeführt werden. Die Benutzeroberfläche der Vermessungsfunktion ist in Abbildung 41 dargestellt.

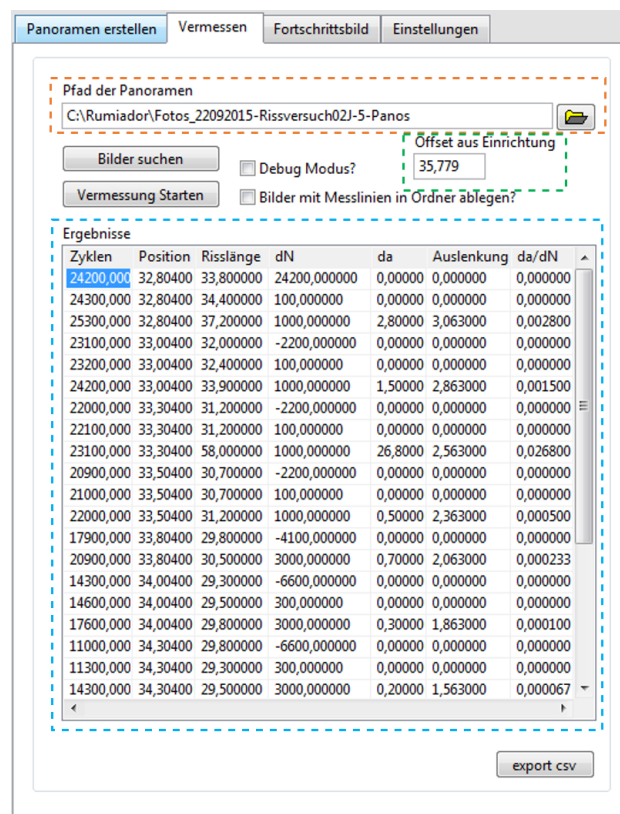


Abbildung 41: Benutzeroberfläche - Vermessung

Um Panoramen zu vermessen ist es nun nötig, den Ordner anzugeben, in welchem die Panoramen gespeichert sind (orange Markierung). Hierbei ist zu beachten, dass alle Bilder im Ordner untersucht werden. Daher müssen vor dem Vermessen alle fehlerhaften Bilder sowie alle Dateien, welche keine Panoramen sind, aus dem jeweiligen Ordner entfernt werden. Die Vermessung der Bilder erfolgt einzeln. Sie werden an das Sub-VI - CrackSearch.vi - weitergegeben und in diesem vermessen. Die ermittelten Größen (blaue Markierung) werden dann zurückgegeben und nach Abschluss der Vermessung in Listenform sortiert nach Auslenkung, dargestellt. Im Feld (Offset aus Einrichtung - grüne Markierung) ist die Position des Läufers bei gewünschter Ausgangsvorspannung anzugeben. Ausgehend von dieser Position wird die Auslenkung errechnet. Es gibt die Möglichkeit vor dem Vermessen die Ränder der Probe zu erkennen. Wird dieser Haken gesetzt, erfolgt die Beschneidung der Probe gemäß der erkannten Ränder vor der Vermessung. Mit dieser Option sollte man vorsichtig sein, da bei dieser Funktion das Ausgangsbild überschrieben wird. Falls die Ränder falsch erkannt werden, bleibt nur das fehlerhaft beschnittene Bild erhalten. Neben dieser Option ist es möglich, die

Bilder mit den Vermessungslinien im Ordner abzulegen. Mit gesetzten Debug-Haken wird der User nach jeder Vermessung aufgefordert, die erkannte Risslänge zu bestätigen.

Messprinzip:

Bei der Analyse der Panoramen wird mit Helligkeitsprofilen gearbeitet. Diese stellen eine Grundfunktion des Vision-Pakets dar. In Abbildung 42 ist die Anordnung der Linienprofile ersichtlich.

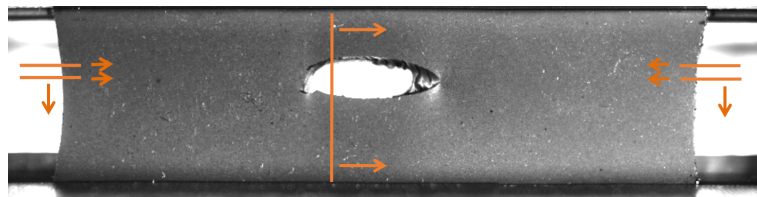


Abbildung 42: Verlauf der Helligkeitsprofile

Zunächst werden die linke und rechte Kante der Probe bestimmt. Hierzu wird vom Bildrand ausgehend eine horizontale Linie an die Probe herangefahren bis die Helligkeitswerte einen Grenzwert unterschreiten. Es wird die abfallende Flanke des Helligkeitsprofils bestimmt. In Abbildung 44 ist ein solches Profil zu erkennen, die Helligkeitswerte im weißen Licht liegen bei ca. 255, sobald die Linie die Kante trifft fallen diese rapide ab. Um zu gewährleisten dass die Kante nicht an fehlerhaften Pixeln erkannt wird, verwendet die Erkennung Mittelwerte. Wie in Abbildung 43 dargestellt ist, werden 100 Pixel vermessen, wobei der Mittelwert der ersten 90 Pixel sowie der letzten zehn gebildet wird. Die Grenzwerte der Triggerung lassen sich im Reiter Einstellungen des - RissAnalyse.vi - verändern. Da eine Probe an der Stelle der horizontalen Linie

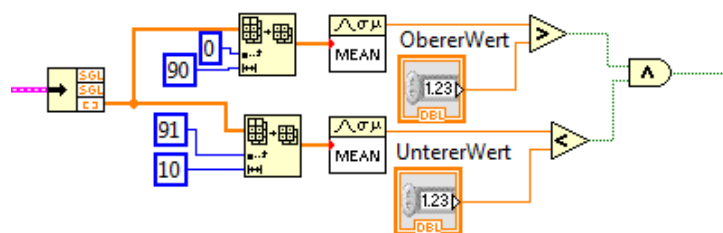


Abbildung 43: Berechnung der Helligkeitsgrenzwerte

einen Riss aufweisen kann, werden mehrerer Linien im Abstand von zehn Pixel an die

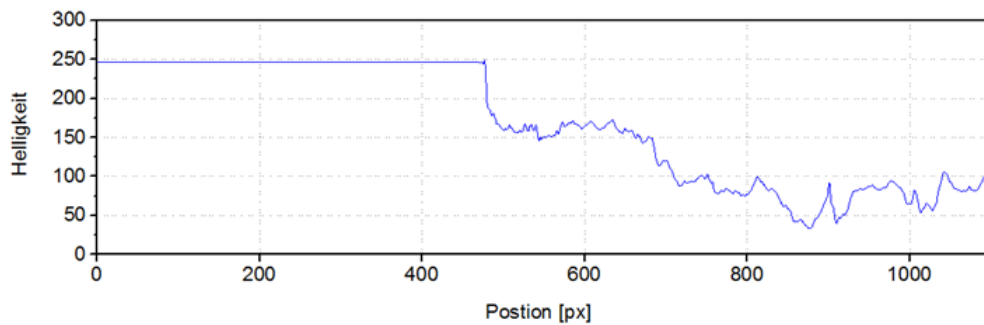


Abbildung 44: Helligkeitsprofil der Probenkante

Probe herangefahren. Die so ermittelten Kantenwerte werden dann gemittelt und als Probenkante gespeichert. Die rechte Kante wird in analoger Weise ermittelt. Auch die Rissermittlung erfolgt mit einem Linienprofil, welches in vertikaler Ausrichtung über die Probe wandert und Bereiche mit weißem Licht (Durchriss) ermittelt. Das Helligkeitsprofil eines Durchrisses ist in Abbildung 45 dargestellt.

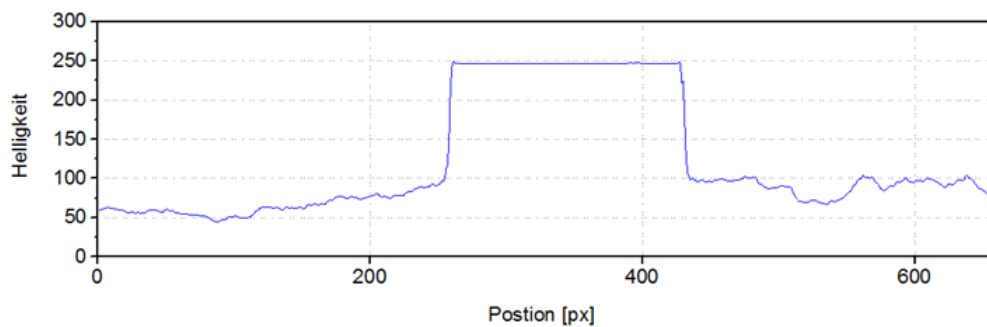


Abbildung 45: Helligkeitsprofil eines Risses

Es wird die Lage der Pixel in horizontaler Richtung gespeichert, an welchen die Risprofilinie einen gewissen Grenzwert überschreitet. Auch dieser Grenzwert kann im Reiter Einstellungen angepasst werden. Da es durch Verunreinigungen auf der Oberfläche zu punktweise hellen Bereichen kommen kann, werden am Ende der Untersuchung die zwei Bereiche im Array ausgemacht, welche die größte Ausdehnung besitzen. Nachdem die Risse vermessen worden sind, werden die errechneten Risswachstumsraten in die Benutzeroberfläche geplottet (Abbildung 46). Die Risswachstumsrate bei einer Belastungsstufe (definierten Auslenkung) errechnet sich aus der Risslängen-

änderung da über die Hauptlast geteilt durch die Zyklenzahl dN der Hauptlast.

$$\text{Risswachstumsrate} = \frac{da}{dN} \quad (17)$$

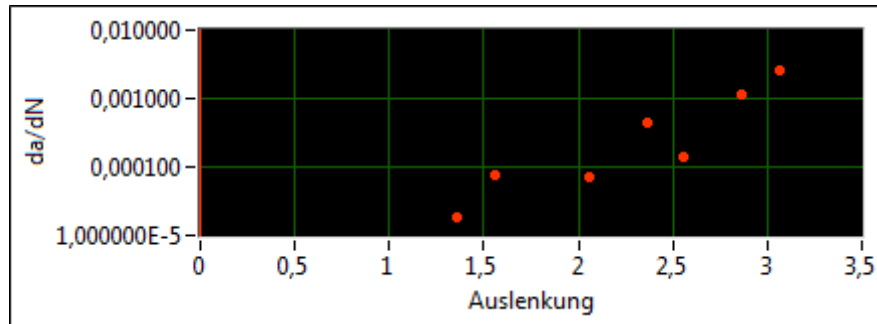


Abbildung 46: Rissausbreitungsdaten einer Messung

6.3 Fortschrittsbild

Nachdem die Panoramen vermessen wurden, ist es möglich ein Fortschrittsbild zu erzeugen. Es dient als Übersichtsdarstellung, mit welchem schnell der Ort des Rissbeginns und der Verlauf des Risswachstums erkennbar sind (Abbildung 47).

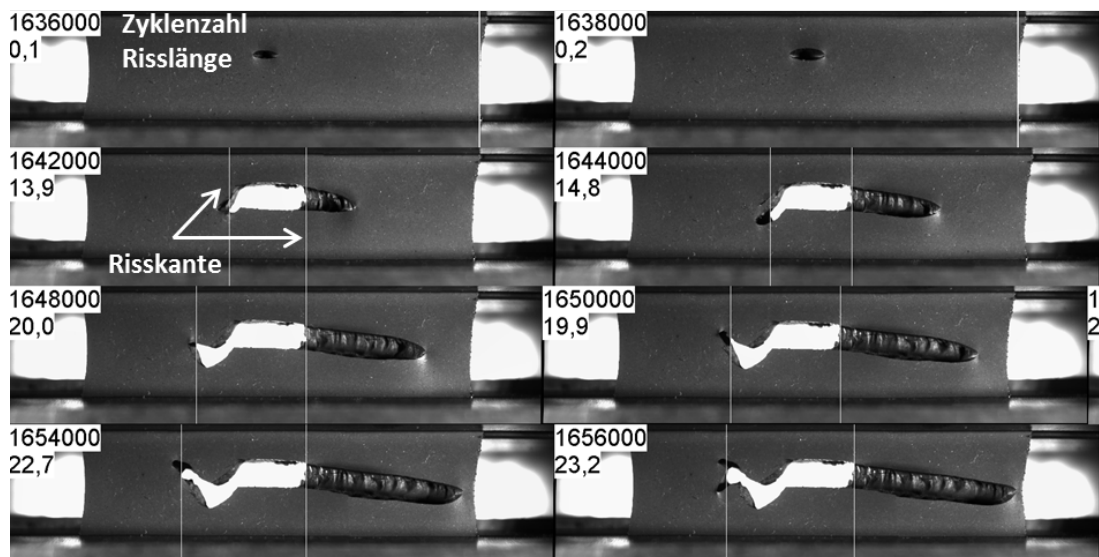


Abbildung 47: Fortschrittsbild mit Vermessungslinien

6.4 Einstellungen

Bei der Erzeugung des Fortschrittsbilds kann eingestellt werden, ob die Vermessungslinien und Beschriftungen in den Übersichtsbildern eingeblendet werden sollen. Neben dieser Funktion ist es möglich die Anzahl der Spalten des Übersichtsbilds (Abbildung 47 - zwei Spalten) festzulegen. Der Skalierungsfaktor beschreibt die Größenänderung der einzelnen Bilder in der Übersichtsdarstellung. Die möglichen Einstellungen sind in Abbildung 48 dargestellt.

The image shows two panels of software settings. The left panel, titled 'Allgemein', contains three sections: 'Umrechnungsfaktor Pixel -> mm' with a value of 55, 'Abstand der Backen bei Offset [Pixel]' with a value of 700, and 'Panoramaerstellung' which includes 'Drehung der Einzelbilder [°]' set to -0,5, 'Crop' set to 2500x900+100+250, and 'Entzerrung' set to -14.2;-14.2;-14.2;-14.2. The right panel, titled 'Risserkennung', contains three sliders: 'Kanten Grenzwert oben' with a value of 224, 'Kanten Grenzwert unten' with a value of 140, and 'Rissgrenzwert' with a value of 160. Each slider has a range from 0 to 255.

Section	Parameter	Value
Allgemein	Umrechnungsfaktor Pixel -> mm	55
	Abstand der Backen bei Offset [Pixel]	700
	Panoramaerstellung	
Panoramaerstellung	Drehung der Einzelbilder [°]	-0,5
	Crop	2500x900+100+250
	Entzerrung	-14.2;-14.2;-14.2;-14.2
Risserkennung	Kanten Grenzwert oben	224
	Kanten Grenzwert unten	140
	Rissgrenzwert	160

Abbildung 48: Einstellung der Analysesoftware

7 Messungen

Im Folgenden werden Messungen, welche mit dem entwickelten System durchgeführt wurden, dargestellt. Die Ergebnisse werden mit denen des Keyence-Systems der zweiten Prüfmaschine des Instituts, die eine kommerzielle Prüfmaschine der Firma MTS ist, verglichen. Die Messungen des Keyence-Systems stellen die Referenzmessung dar.

7.1 Prüfmethodik

Es werden Risswachstumsmessungen an gekerbten Proben durchgeführt. Dazu muss in die Proben ein definierter Riss eingebracht werden. Die Probenpräparation erfolgt mithilfe der MTS, da diese über die nötige Kraftmessdose sowie die geführte Schnitteinbringungs-vorrichtung verfügt. Die geführte Schnitteinbringung ist nötig um einen klar definierten, horizontalen Riss mit vorgegebener Länge einzubringen. Die Risseinbringung erfolgt unter 20 Newton Zugbelastung. Die Rasierklinge wird maximal 3-mal verwendet, um scharfe Kanten der eingebrachten Kerbe zu gewährleisten. Nach Einbringung des Risses wird die Auslenkung notiert. Da der Rumiador über keine Kraftmessdose verfügt, wird die Auslenkung bei 20 Newton zu den Kurven hinzuge-addiert und somit der gewünschte Vorspannungszustand erzeugt. Jede Polymermischung wird aufgrund anderer Eigenschaften mit speziellen Anweisungslisten bzw. Lastzyklen getestet. Bei diesen Anweisungslisten wird stets die Belastung nach jedem Vor- und Hauptlastzyklus gesteigert.

7.2 Belastungsroutine

Bei den vermessenen Proben handelt es sich um SBR (Styrol-Butadien-Kautschuk) mit 50phr (parts per hundred parts rubber) Ruß. Der Ruß ist vom Typ N550 und wird als mittelaktiv Ruß eingestuft. Die Belastungsroutine für die Mischung umfasst neun Zyklen. Das Verhältnis von Druckamplitude zu Zugamplitude beträgt stets 0,5. Die Auslenkungen der Stufen sind in Tabelle 1 dargestellt. Es werden 5 Proben vermessen. Es werden Vorlast und Hauptlaststufen unterschieden. Die Vorlast ist nötig um bei definierter Auslenkung eine natürliche Risspitze auszubilden. Im Hauptlastzyklus stellt sich ein gleichmäßiges Risswachstum ein.

Sinus - 5Hz Belastungsverhältnis: -0.5					
Nr.	Zug	Druck	Vorlast	Hauptlast	Gesamt
1	-1,00	0,5	500	5000	5500
2	-1,30	0,65	500	5000	5500
3	-1,50	0,75	300	3000	3300
4	-1,80	0,90	300	3000	3300
5	-2,00	1,00	300	3000	3300
6	-2,30	1,15	100	1000	1100
7	-2,50	1,25	100	1000	1100
8	-2,80	1,40	100	1000	1100
9	-3,00	1,50	100	1000	1100

Tabelle 1: Belastungsroutine

7.3 Fortschrittsbild

Aus Übersichtsgründen wird nur ein Ausschnitt des Fortschrittsbilds (Abbildung 49) dargestellt. Es zeigt den eingebrachten Riss der Länge 26,3 mm sowie die Ausdehnung nach: Stufe 1 - Vorlast & Hauptlast, Stufe 2 - Hauptlast und Stufe 3 - Vorlast & Hauptlast

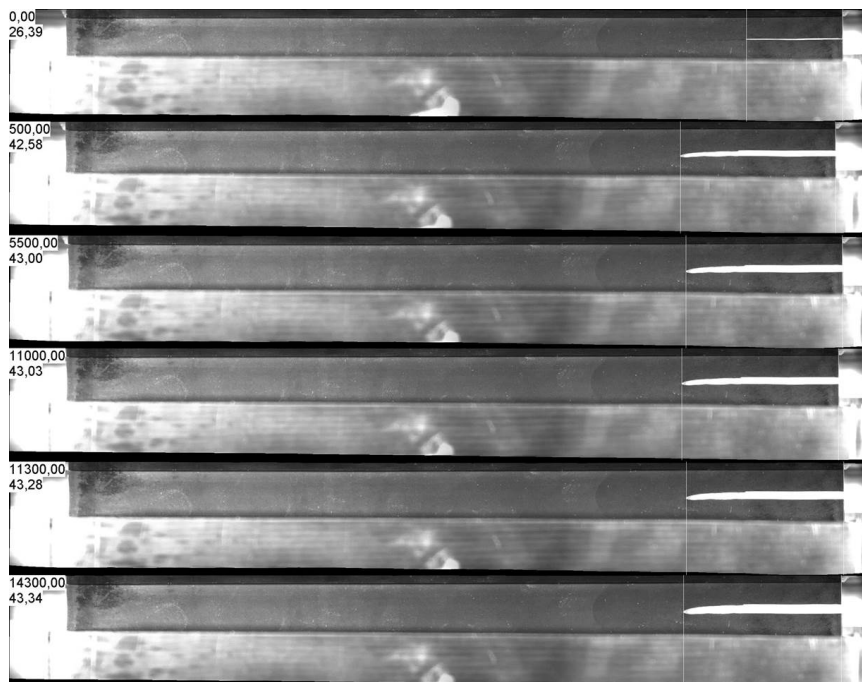


Abbildung 49: Ausschnitt des Fortschrittsbilds

7.4 Risswachstums-Messungen

In den folgenden Diagrammen sind die Messungen dargestellt. In Abbildung 50 sind die automatischen Messungen und die zugehörigen manuell vermessenen Längen abgebildet. Die Proben wurden zusätzlich mit einem Mikroskop-Bildverarbeitungsprogramm manuell vermessen um festzustellen, ob es durch die automatische Vermessung zu fehlerhaften Messungen kommt, bzw. festzustellen, welche Abweichungen durch die automatische Vermessung entstehen. Beide Messmethoden zeigen die gleiche Tendenz, so erhöht sich die Rissausbreitungsrate mit steigender Auslenkung. In den Bereichen mit niedriger Auslenkung 0-2,25 mm weichen die Messwerte leicht voneinander ab. Ab einer Auslenkung von 2,25 mm stimmen die manuell erhobenen Messwerte gut mit den automatischen überein.

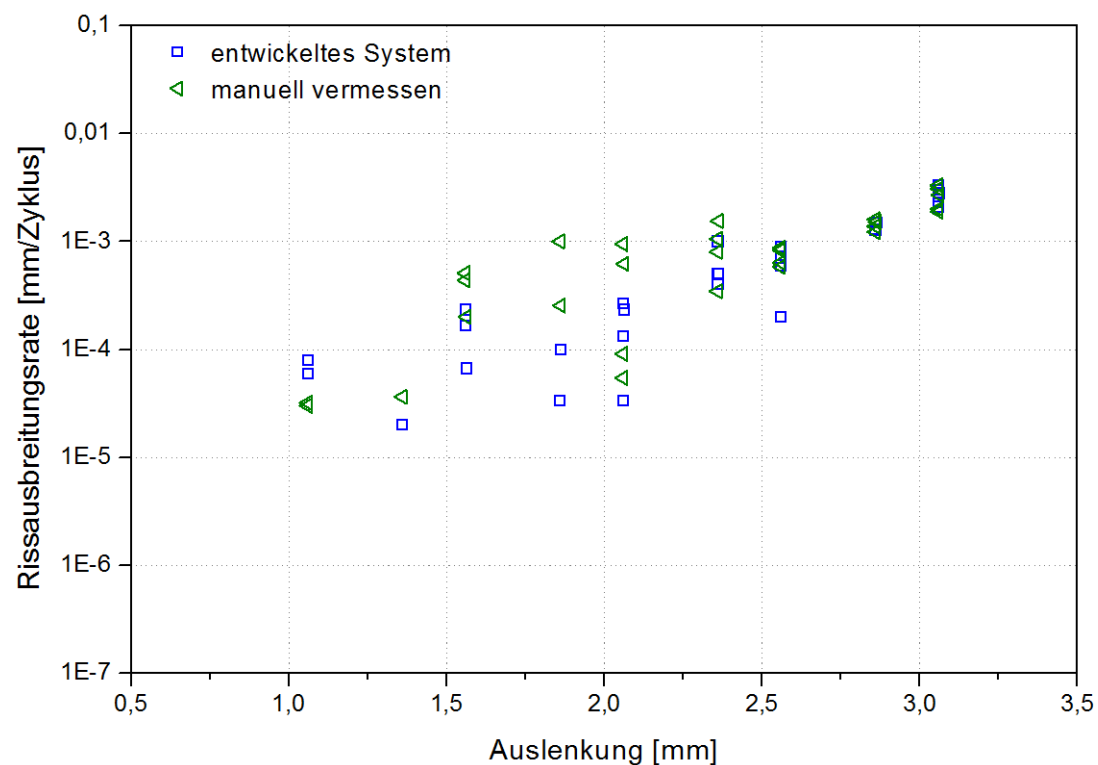


Abbildung 50: Vergleich der Software Vermessung und manuelle Vermessung

In Abbildung 51 sind die Messwerte der MTS und des entwickelten Systems abgebildet. Beide Messgeräte zeigen wiederum die gleiche Tendenz. Die Rissausbreitungsrate nimmt wie erwartet mit der Auslenkung zu. Die Messwerte des Keyence Systems streuen ebenso im Bereich kleiner Auslenkung größer als in den stark gedehnten Bereichen.

Der Anstieg der Messwerte ist beim selbst entwickelten System etwas geringer.

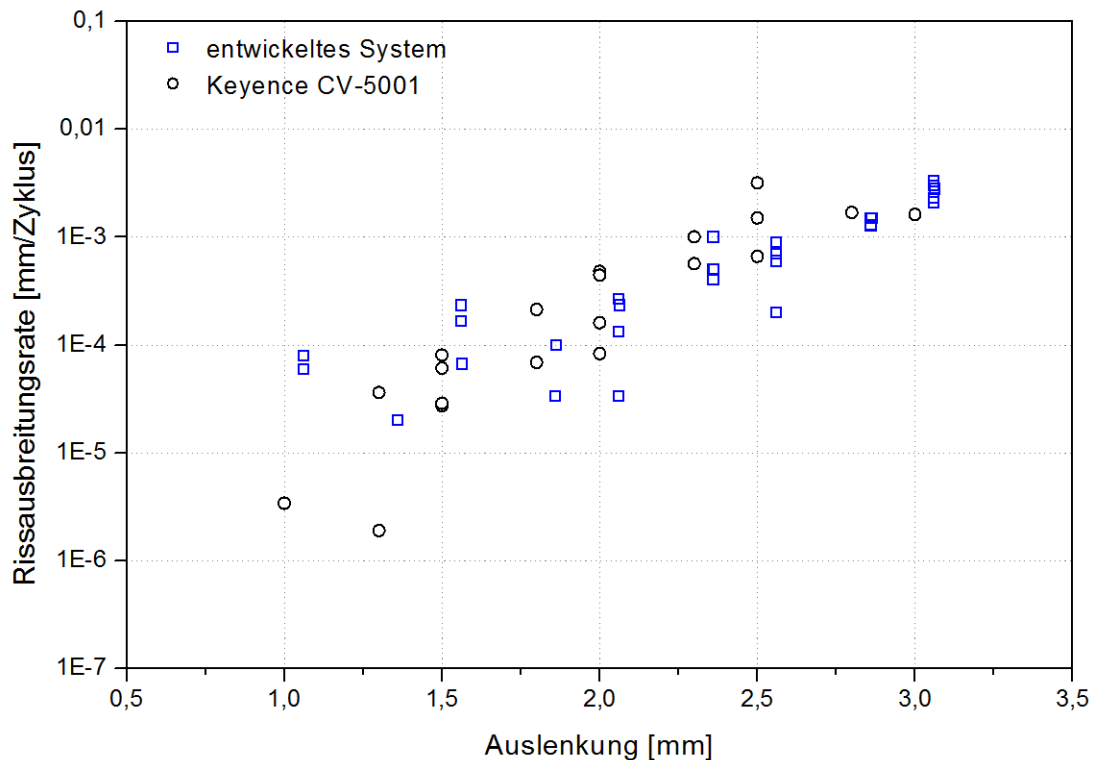


Abbildung 51: Ergebnisse im Vergleich mit MTS Messung

7.5 Interpretation der Risswachstumsmessungen

Die bestimmten Risswachstumskurven zeigen ähnliches Verhalten. Die Streuung nimmt bei steigender Dehnung ab. In den Bereichen kleiner Auslenkungen kommt es zu großer Streuung, welche möglicherweise durch den absoluten Fehler der Panoramaerstellung zu begründen ist. Dieser nimmt bei kleiner Ausbreitungsgeschwindigkeiten einen höheren Prozentsatz ein und verfälscht das Ergebnis daher signifikant. Neben dieser Fehlerquelle ist auch zu beachten, dass zum Zeitpunkt der Versuche keine Kraftmessdose am Messgerät installiert war, und daher der Ausgangszustand jeder Probe nicht als definiert angesehen werden kann. Zusätzlich wurden die Messwerte des entwickelten Systems manuell vermessen. Es zeigen sich ab einer Auslenkung von 2,5 mm gute Ergebnisse.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel ein System zu entwickeln, welches den Prüfvorgang der bestehenden dynamischen Zug-Druck Prüfeinrichtung kontrolliert. Es wurde ein stabiler Lauf der Steuerungssoftware erreicht, wodurch nun Langzeitmessungen durchgeführt werden können. Ein optisches System, das selbstständig Bilder der Proben während des Prüfvorgangs macht, wurde erfolgreich installiert. Es können der Rissfortschritt durch Bilder festgehalten und mit der externen, selbst erstellten Software Rissfortschrittskurven generiert werden. Die Risswachstumskurven des optischen Systems zeigen im Bereich großer Auslenkungen keine großen Abweichungen vom kommerziellen Keyence-System. Die Qualität der Messwerte in Bereichen niedriger Auslenkung zeigen Abweichungen, welche jedoch durch die Montage einer Kraftmessdose reduziert werden können. Die Implementierung der Dose wurde bereits während der Diplomarbeit begonnen. Durch die Verwendung einer höher auflösenden Kamera, welche größere Bildausschnitte darstellen kann, kann der Fehler bei der Panoramaerstellung verringert werden. Dies würde zu genaueren Messungen führen und vor allem in Bereichen kleiner Auslenkung die Ergebnisse vergleichbarer mit der MTS machen.

Kostenaufstellung

Die Gesamtkosten des Systems sind in folgender Tabelle aufgelistet.

Beschreibung	Anzahl	Gesamtpreis
Zahnriemen Profil T2,5 1 Meter	2	23,70 €
Schrittmotor JK42HS40-1704 / 1,8° / 200 Schritte	2	36,00 €
Linearlager inkl. Gehäuse 12 mm Welle SMA	8	58,40 €
Linearwelle, Präzisionswelle Ø 12 mm, 500 mm, gehärtet	4	30,76 €
Wellenbock SK für 12 mm Wellen	8	55,20 €
Nutenstein Profil 8 Gewinde M5	2	36,00 €
Zylinderschraube M 5 x 12 DIN912, verzinkt	30	20,70 €
Aluminium Platte AlMg4,5Mn	2	27,96 €
Zahnriemenrad Profil T2,5; 22 Zähne; Riemenbreite 6 mm	2	9,18 €
Zahnriemenrad Profil T2,5; 28 Zähne; Riemenbreite 6 mm	2	9,18 €
Zylinderschraube M 5 x 12 DIN912, verzinkt	30	4,20 €
Schrittmotor-Treiber Pololu A4988	2	27,00 €
Kamera - IGC205G	1	256,00 €
Objektiv - MV-O0612-FU	1	95,00 €
Kabel - KS-MUSB2-AB 03.0	1	6,00 €
Gesamt		695,00 €
Versand		17,70 €
Gesamt		712,98 €

Tabelle 2: Kostenaufstellung des optischen Systems

Pinbelegung Arduino Mikrocontroller

Funktion	Verwendeter Pin
Endschalter vorne links	analog A0
Endschalter vorne rechts	analog A1
Endschalter hinten rechts	analog A2
Endschalter hinten rechts	analog A3
Nicht verwendet	analog A4
Nicht verwendet	analog A5
RX (LIFA)	digital D0
TX (LIFA)	digital D1
Lampe vorne links	digital D2
Schrittmotortreiber vorne Aus	digital D3
Lampe vorne rechts	digital D4
- Nicht verwendet -	digital D5
Puls Schrittmotor vorne	digital D6
Richtung Schrittmotor vorne	digital D7
Schrittmotortreiber hinten aus	digital D8
Lampe hinten	digital D9
- Nicht verwendet -	digital D10
- Nicht verwendet -	digital D11
Puls Schrittmotor hinten	digital D12
Richtung Schrittmotor hinten	digital D13

Tabelle 3: Pinbelegung Arduino Mikrocontroller

Abbildungsverzeichnis

1	Zug-Druck-Prüfmaschine	2
2	Ausgangszustand des Interpreters	3
3	Abstrakte Darstellung der Steuerung	4
4	Elastomerverhalten bei Verformung	5
5	Biegebelastung eines Riemens	6
6	Einfluss der Füllstoffe	9
7	Phasenverschiebung [10]	11
8	Komplexer Modul - Zeigerdiagramm	12
9	Spannungs-Dehnungs Diagramm mit Hysterese	12
10	Rissöffnungsarten	13
11	Optisches System - mechanischer Aufbau	17
12	3D-gedruckte Lampe	17
13	Accelstepper Step-Funktion	18
14	Beschaltung des Mikrocontrollers	20
15	Pololu A4988	20
16	Datenpaketstruktur LIFA	22
17	LaVision Strainmaster [20]	23
18	digitale Bildkorrelation	24
19	Keyence CV-5001 Auswerteeinheit	24
20	Front-Panel des Hauptprogramms	26
21	Anweisungsliste mit Fotostopp und Sprunganweisung	27
22	Datenstruktur - Zeile einer AWL	28
23	Kurven-ID eintragen und Command-Table Start	29
24	Kurve wählen - Anweisungsliste	29
25	Kurve mit 2 mm Offset	30
26	Korrektur des Kurvenoffsets	31

27	Abbruchkriterium nach Zyklenzahl	31
28	Struktur des Command-Tables in Drive	32
29	Fall 2 - Position anfahren	33
30	Verarbeitung eines Sprungbefehls	34
31	Fall 5 - Ausgänge schalten	34
32	Initialisierung des Arduino	35
33	Fotoerstellen mit Schlittenfahrt	36
34	Dateistruktur der Fotos	36
35	Fotostopp einrichten	37
36	Benutzeroberfläche Rissanalyse.vi	40
37	tönnenförmige Verzeichnung [21]	41
38	Batch Skript - Entzerren	41
39	Ränderentstehung durch Korrektur	42
40	Erzeugung eines Panoramas	42
41	Benutzeroberfläche - Vermessung	43
42	Verlauf der Helligkeitsprofile	44
43	Berechnung der Helligkeitsgrenzwerte	44
44	Helligkeitsprofil der Probenkante	45
45	Helligkeitsprofil eines Risses	45
46	Rissausbreitungsdaten einer Messung	46
47	Fortschrittsbild mit Vermessungslinien	46
48	Einstellung der Analysesoftware	47
49	Ausschnitt des Fortschrittsbilds	49
50	Vergleich der Software Vermessung und manuelle Vermessung	50
51	Ergebnisse im Vergleich mit MTS Messung	51

Tabellenverzeichnis

1	Belastungsroutine	49
2	Kostenaufstellung des optischen Systems	53
3	Pinbelegung Arduino Mikrocontroller	54

Literatur

- [1] Gohl Walter und Spies Karl H. *Elastomere - Dicht- und Konstruktionswerkstoffe - Gummitechnik, Richtlinien und Anwendungsbeispiele für Konstruktion und Praxis*. Expert-Verlag, Renningen, 5. Auflage, 2003.
- [2] Rinnbauer Meike. *Technische Elastomerwerkstoffe - Basis für Hightech-Lösungen in der Dichtungs- und Schwingungstechnik*. Verlag moderne Industrie, Landsberg am Lech, 1. Auflage, 2006.
- [3] Haberhauer Horst und Ferdinand Bodenstein. *Maschinenelemente - Gestaltung, Berechnung, Anwendung*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 17. Auflage, 2013.
- [4] Domininghaus Hans. *Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 2013.
- [5] Stoczek Radek. *Dynamische Rissausbreitung in Elastomerwerkstoffen*. PhD thesis, Technischen Universität Chemnitz, 2012.
- [6] Abts Georg. *Kunststoff-Wissen für Einsteiger*. Carl Hanser Verlag, München, 2014.
- [7] Tiberfarm GmbH. Timberfarm. <http://Timberfarm.de>, Zugriff: 01.03.2016.
- [8] F. Röthemeyer und F. Sommer. *Kautschuk Technologie: Werkstoffe, Verarbeitung, Produkte*. Hanser, 2001.
- [9] Bonnet Martin. *Kunststoffe in der Ingenieur Anwendung - verstehen und zuverlässig auswählen*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1. Auflage, 2009.
- [10] Wrana Claus. *Polymerphysik - Eine physikalische Beschreibung von Elastomeren und ihren anwendungsrelevanten Eigenschaften*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1. Auflage, 2014.
- [11] Gross Dietmar. *Bruchmechanik - Grundlagen, Lineare Bruchmechanik*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 2013.
- [12] Heinrich Gert, Klüppel Manfred, Vilgis Thomas, und Horst Thomas. Wenn Gummi zu Bruch geht. *Physik Journal*, 39, 05 / 2012.
- [13] Griffith A. A. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 221(582-593):163–198, 1921.

-
- [14] Thomas A. G. und Rivlin R. S. Rupture of rubber. *Rheologica Acta*, 2(1):63–66.
- [15] Matthew Brown. Autostitch. <http://matthewalunbrown.com/autostitch/autostitch.html>, Zugriff: 01.03.2016.
- [16] AutoHotkey Foundation LLC. Autohotkey. <https://autohotkey.com/>, Zugriff: 01.03.2016.
- [17] Wiki.panotools.org. Fulla - panotools.org wiki. <http://wiki.panotools.org/Fulla>, Zugriff: 01.03.2016.
- [18] LLC ImageMagick. Imagemagick: Command-line tools: Mogrify. <http://imagemagick.org/script/mogrify.php>, Zugriff: 01.03.2016.
- [19] Keyence GmbH. Das komplette Spektrum der Automatisierungstechnik - Sensorik, Messtechnik, Mikroskopie und mehr. | KEYENCE Deutschland. <http://keyence.de>, Zugriff: 01.03.2016.
- [20] LaVision GmbH. Lavigation - focus on imaging. <http://lavigation.de>, Zugriff: 01.03.2016.
- [21] Wikipedia. Verzeichnung. <https://de.wikipedia.org/wiki/Verzeichnung>, Zugriff: 01.03.2016.