



Aufbau eines Messplatzes zur elektromechanischen Prüfung von Piezo-Aktoren



Diplomarbeit am
Institut für Struktur- und Funktionskeramik
an der Montanuniversität Leoben

Danksagung

Ich möchte mich herzlich bedanken bei

Herrn o. Univ.-Prof. Mag. Dr. Robert DANZER für die Gewährung dieser Diplomarbeit sowie die großzügige Bereitstellung seines Erfahrungsschatzes auf jeglichem Gebiet,

Herrn Ing. Alois LANG für die Einschulung, Betreuung und (aufopfernde) Hilfestellung rund um die Uhr in der Programmiersprache LabVIEW, die die positive Umsetzung dieser Diplomarbeit überhaupt möglich gemacht hat,

meinem ersten Diplomarbeitsbetreuer Herrn DI Hannes GRÜNBICHLER für die Übertragung der Diplomarbeit und die umfangreiche Unterstützung auch über sein Dienstverhältnis an der Universität hinaus,

meinem zweiten inoffiziellen Diplomarbeitsbetreuer Herrn DI Dr. Marco DELUCA für die Hilfe beim Verfassen der Diplomarbeit sowie dem aus dem Weg räumen diverser Probleme,

meinem zweiten offiziellen Diplomarbeitsbetreuer Herrn Ao.Univ.-Prof. Mag.rer.nat Dr.mont. Peter SUPANCIC für die umfassende Betreuung und Hilfestellung jeglicher Art,

meiner quasi Sekretärin Frau Kathrin SCHMIDBERGER, ohne die dieses Werk niemals in adäquater Form auf Papier gebracht hätte werden können, für die mentale Unterstützung und Aufmunterung,

Herrn Clemens KRAUTGASSER für die Versorgung mit wichtigsten Informationen in Bezug auf die Aktorenprüfung, insbesondere an Sonn- und Feiertagen bzw. zu den außergewöhnlichsten Uhrzeiten,

den Kollegen am Institut für Struktur- und Funktionskeramik, die mir bei all nur erdenklichen Problemen mit Rat und Tat zur Seite gestanden sind,

bei meiner Familie, die mir das langjährige Studium an der Montanuniversität ermöglicht hat,

sowie meinen Freunden, die mir in so manch aussichtloser Situation Mut und Durchhalteparolen zugesprochen haben,

MATERIALS CENTER LEOBEN Forschung GmbH für Überantwortung dieser Diplomarbeit und die finanzielle Unterstützung,

der österreichischen Bundesregierung (insbesondere dem Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie und dem Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend) sowie dem Land Steiermark, vertreten durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH und die Steirische Wirtschaftsförderungsgesellschaft mbH, für die finanzielle Unterstützung der Forschungsarbeiten im Rahmen des von der Materials Center Leoben Forschung GmbH abgewickelten K2 Zentrums für „Materials, Processing und Product Engineering“ im Rahmen des Österreichischen COMET Kompetenzzentren Programms.

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides Statt, dass die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

AFFIDAVIT

I declare in lieu of oath, that i wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

.....
Leoben, im September 2011

.....
Martin Sylvester SEEMANN

Kurzfassung

In der Automobilindustrie werden seit einigen Jahren keramische Vielschichtaktoren als Steuerelemente für die Kraftstoffeinspritzung verwendet. Der Schlüsselwerkstoff dieser Hochleistungsanwendung ist polykristallines Blei-Zirkonat-Titanat, welches aufgrund von ferroelektrischen als auch ferroelastischen Eigenschaften ein nichtlineares, piezoelektrisches Verhalten (z.B. Hysteresen) aufweist. Aufgrund dessen hängen die effektiven Bauteileigenschaften von Temperatur, mechanischer und elektrischer Belastung ab und müssen für alle relevanten Arbeitspunkte bestimmt werden. Am Institut für Struktur- und Funktionskeramik/Montanuniversität Leoben wurde ein elektromechanischer Messplatz durch Kombination einer Universalprüfmaschine mit einer Sawyer-Tower-Schaltung realisiert. In dieser Arbeit wurde eine Spannungsausregelung verwirklicht, um Experimente mit vorgegebener elektrischer Spannung am Bauteil durchführbar zu machen. Die Ansteuerung erfolgt mittels eines selbst erstellten Programms in der Programmiersprache LabVIEW der Firma National Instruments. Im Zuge dieser Arbeit wird zusätzlich der Prüfstand zum Prüfen von Aktoren höherer Kapazität durch Anpassung der Vergleichskapazität der Sawyer-Tower-Messschaltung erweitert. Eine Verifikation dieses neu entwickelten Messsystems wurde an diversen kommerziellen Bauteilen erfolgreich durchgeführt.

Abstract

In the last few years ceramic multilayer actuators are being used to control fuel injection in the automotive industry. The key material of this high performance application is lead zirconate titanate, which shows due to its ferroelectrical and ferroelastical properties a non-linear, piezoelectric behaviour (e.g. hysteresis). Effective properties of these devices depend on temperature, mechanical and electrical loading and therefore they have to be determined at all relevant operating points. At the Institut für Struktur- und Funktionskeramik/Montanuniversität Leoben an electromechanical test site was set up by the combination of a universal testing machine with a Sawyer-Tower-circuit. In this thesis a voltage regulation is developed in order to enable experiments assuring a certain electrical loading of the device. The set up is driven by a newly written program using the programming language LabVIEW provided by NATIONAL INSTRUMENTS. In the course of this project the test site is upgraded via an increased equivalent capacity situated in the Sawyer-Tower-circuit. The verification of this new developed measurement method was carried out on several commercial devices.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	10
1.1	Aufbau der Arbeit.....	13
2	Allgemeine Grundlagen.....	13
2.1	Piezoelektrizität.....	14
2.2	Pyroelektrizität.....	16
2.3	Ferroelektrizität.....	17
2.4	Domänen und deren Verhalten.....	21
2.5	Der Werkstoff PZT: Blei-Zirkonat-Titanat.....	22
2.5.1	Grundzüge der Herstellung von PZT.....	23
2.5.2	Additive für PZT: „Harte“ und „Weiche“ PZT.....	25
2.6	Multilayer-Aktoren auf Basis PZT.....	26
2.6.1	Allgemein.....	26
2.6.2	Allgemeiner Aufbau und Eigenschaften.....	27
2.6.3	Herstellung von Aktoren.....	29
2.6.4	Aufbau eines Piezo-Aktors.....	29
3	Mechanische Prüfung von Aktoren.....	31
3.1	Aufbau des elektromechanischen Messplatzes.....	31
3.1.1	Mechanische Komponenten.....	33
3.1.2	Elektrische Komponenten.....	34
3.2	Ablauf einer Aktorenprüfung.....	37
3.2.1	Probenpräparation.....	37
3.2.2	Vorbereitung des Prüfaufbaues.....	38
3.2.3	Prüfablauf.....	38
3.3	Auswertung.....	39
3.4	Diagramme.....	40
3.5	Erweiterung des Aktoren-Messplatzes.....	43
3.5.1	Stufe 1: Kapazitätserhöhung der Vergleichskapazität.....	43
3.5.2	Stufe 2: Etablierung einer Spannungsregelung.....	44

4	LabVIEW.....	45
4.1	Anforderungen an das LabVIEW Programm.....	47
4.2	Erwartete Vorteile durch den Einsatz von LabVIEW:.....	48
4.3	Mögliche Nachteile durch den Einsatz von LabVIEW	49
4.4	Auswahl des Reglers	50
4.5	Verwendete Hard- und Software.....	52
4.6	SNAW	53
5	Versuche	57
5.1	Verifikation der LabVIEW Erweiterung.....	57
5.1.1	Messaufbau und Messmethoden	57
5.1.2	Auswertung	58
5.1.3	Diskussion der Ergebnisse	63
5.2	Vermessung eines Piezo-Aktors mit hoher Kapazität.....	64
5.2.1	Messaufbau.....	65
5.2.2	Auswertung	66
5.2.3	Diskussion der Ergebnisse	67
6	Zusammenfassende Betrachtung	67
6.1	Ausblick	69
7	Anhang.....	71
8	Literaturverzeichnis	86

Verwendete Symbole

C	Kapazität des Kondensators	[F]
C_P	Kapazität des Aktors	[F]
C_0	Vergleichskapazität	[F]
d	piezoelektrischer Koeffizient	[Cm ⁻¹]
E	elektrische Feldstärke	[Vm ⁻¹]
E_{Stack}	elektrische Feldstärke	[Vm ⁻¹]
f_{max}	maximale darstellbare Frequenz	[Hz]
i_0	Leckstrom	[A]
K_I	Integrierbeiwert	[s ⁻¹]
l	Abstand der Elektroden	[m]
P	Polarisation	[Cm ⁻²]
P_{pp}	Punkte pro Periode	[]
P_s	spontane Polarisation	[Cm ⁻²]
p_i	pyroelektrischer Koeffizient	[Cm ⁻² K ⁻¹]
Q	zugeführte Ladung	[C]
R	ohmscher Widerstand	[Ω]
R_A	Radius Kation A	[m]
R_B	Radius Kation B	[m]
R_O	Radius Sauerstoff-Anion	[m]
T	Periodendauer	[s]
T_I	Nachstellzeit	[s]
t	Zeit	[s]
t_s	Zeit pro Schleifendurchlauf	[s]
U	Spannung am Kondensator	[V]
U_{AC}	Gesamtspannung (Wechselspannung)	[V]
U_{DC}	Gesamtspannung (Gleichspannung)	[V]
U_P	Spannungsabfall am Piezo-Aktor	[V]
U_{Stack}	elektrische Spannung am Stack	[V]
U_0	Spannungsabfall an der Vergleichskapazität	[V]
x_d	Regelabweichung	[]
y	Stellgröße	[]
y_0	Stellgröße bei $x_d = 0$	[]
δ	Toleranzfaktor	[]
ε	Dehnung	[]
v	Variable zur Darstellung der Stellgröße	[V]
σ	mechanische Spannung	[Nm ⁻²]
σ_P	Oberflächenladung	[Cm ⁻²]
ΔP	Änderung der Polarisation	[Cm ⁻²]
ΔT	Änderung der Temperatur	[K]

1 Einleitung

Die Verwendung von Piezo-Aktoren zur Steuerung von Motorventilen von Kraftfahrzeugen bieten diverse Vorteile gegenüber dem Einsatz von Magnetventilen. Besonders im Bereich der Common-Rail-Technologie, also bei dieselbetriebenen, direkteinspritzenden Kraftfahrzeugen, setzen namhafte Automobilhersteller wie z.B. BMW oder AUDI auf die Verwendung von sogenannten „Piezo-Aktoren“. Diese Bauteile nutzen die Eigenschaften von ferroelektrischen, piezoelektrischen Elektrokeramiken und ermöglichen durch das Anlegen einer definierten elektrischen Spannung eine Längenänderung des Aktors und dadurch einen Hub des Ventils. Der zurzeit am meisten verwendete Werkstoff aufgrund der Materialeigenschaften ist Blei-Zirkonat-Titanat, kurz PZT. Ein großer Vorteil gegenüber der durch Magnetismus getriebenen Alternative ist die äußerst schnelle Bauteilantwort. Hersteller dieser keramischen Bauteile, die in speziell entwickelten Einspritzsystemen ihren Dienst versehen, sind BOSCH und TDK-EPC (vormals EPCOS). Piezo-Aktoren werden hinsichtlich ihrer Anwendung in Geometrie und Kapazität optimiert und treten somit in unterschiedlichen Formen und Größen in Erscheinung. Eine stetige Weiterentwicklung und Verbesserung dieser Bauteile setzt eine exakte Überprüfung der Prototypen voraus. Des Weiteren wird eine gleichbleibend gute Bauteilqualität gefordert, da durch den Defekt nur eines einzigen Aktors und somit eines Ventilausfalles die Antriebsleistung erheblich sinkt bzw. das Aggregat Schaden nimmt oder sogar total ausfällt.

Aufgrund der Abhängigkeit der effektiven Bauteileigenschaften des PZT von elektrischen und mechanischen Belastung sowie der Temperatur, müssen diese für sämtliche relevanten Arbeitspunkte bestimmt werden. Messungen an diesen funktionalen Bauteilen, welche Aufschluss über Dehnung, Hub, Kraft, elektrischer bzw. mechanischer Spannung, Ladung, elektrische Feldstärke und noch weiteren Kennwerten unter verschiedensten mechanischen bzw. elektrischen Belastungen sowie Temperaturen bringen, werden am Institut für Struktur- und

Funktionskeramik/Montanuniversität Leoben an einem elektromechanischen Prüfstand durchgeführt. Die Piezo-Aktor-Proben, welche direkt vom Hersteller an die prüfende Institution geliefert werden, können sowohl in unverkleidetem als auch betriebsfertigem (in eine schützende Ummantelung integriert) Zustand geprüft werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit mit Hilfe einer Temperierkammer das Verhalten ebenfalls unter Einsatztemperatur zu simulieren.

Da sich der Hub des Piezo-Aktors im Anwendungsbereich der Ventilsteuerung im μm Bereich niederschlägt, hat der Prüfaufbau spezielle mechanische Kriterien zu erfüllen. Das Herzstück dieses Prüfstandes ist eine hinsichtlich der Steifigkeit sowohl des Rahmens als auch der Traverse verstärkte Universal-Spindelprüfmaschine, welche in Kombination mit Siliziumnitridstempeln eine Eignung zur Druckbelastungsprüfung von Piezo-Aktoren besitzt. Trotz dieser hohen Steifigkeit müssen dennoch zur hinreichend exakten Bestimmung des Aktor-Hubes drei induktive Wegaufnehmer, welche um 120° in der Ebene versetzt angeordnet sind um etwaige Verkipnungen der Aktor-Probe durch Mittelwertbildung abzumildern, herangezogen werden, da der von der via Traversenweg bestimmte Hub der Prüfmaschine durch Biegung der Traverse verfälscht wird. Diese Wegaufnehmer messen den Abstand der beiden Stempel und somit indirekt den Hub des Aktors.

Da eine direkte Messung der Kapazität bzw. der Ladung nicht möglich ist, bedient man sich der Sawyer-Tower-Schaltung. Der Aktor wird mit einer definierten, sehr viel höheren Vergleichskapazität in Form einer Ladungsbox (mehrere parallel geschaltete Kondensatoren sind in einem Gehäuse untergebracht) in Serie geschaltet und während der Prüfung der Spannungsabfall an ebendieser Vergleichskapazität mittels eines Elektrometers gemessen. Dieses Elektrometer besitzt einen äußerst hohen Innenwiderstand, um eine Entladung des Aktors über das Elektrometer möglichst zu vermeiden. Des Weiteren wird, jedoch aufgrund der im direkten Vergleich relativ hohen auftretenden elektrischen Spannung, ohne Verwendung eines Elektrometers die Gesamtspannung an der Sawyer-Tower-Schaltung direkt von der Universalprüfmaschine gemessen. Durch Bekanntsein der elektrischen Spannung sowohl an der Vergleichskapazität als auch an der Sawyer-Tower-Messbrücke ist es möglich, sowohl auf die effektiv wirksame elektrische Spannung am Aktor als auch

die Ladung rückzurechnen. Die Sawyer-Tower-Schaltung stellt somit einen kapazitiven Spannungsteiler dar. Der Spannungsabfall an der Vergleichskapazität sollte ein Prozent der Gesamtspannung nicht überschreiten, da dieser Spannungsanteil am Bauteil fehlt. Um Aktoren mit hoher Kapazität prüfen zu können, muss dementsprechend die Vergleichskapazität ebenfalls erhöht werden, um dieser Abschwächung der elektrischen Belastung des Bauteils entgegenzuwirken.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird dieser elektromechanische Messplatz aufgewertet. Die primäre Aufgabe ist es, eine Spannungsausregelung direkt am Bauteil zu etablieren, um Experimente mit vorgegebenen Spannungen am Piezo-Aktor durchführbar zu machen. Die Ansteuerung hat durch ein selbst erstelltes Programm in der Programmiersprache LabVIEW zu erfolgen. Dieses Programm hat folgende sekundäre Ziele zu erreichen:

- Bei unipolaren Messungen hat das Absinken von elektrischen Spannungen unter 0 V am zu prüfenden Aktor, welches bei Verwendung der herkömmlichen Messmethode aufgrund des kapazitiven Spannungsteilers nicht vermeidbar war, zu verhindern.
- Die Signalgenerierung, welche bis dato durch einen Frequenzgenerator erzeugt wurde, hat so weit wie möglich automatisiert zu werden und zudem diverse Schutzmechanismen zu enthalten, um z.B. Eingabefehlern von vornherein entgegenzuwirken.
- Die Zu- und Wegschaltung der elektrischen Spannung erfolgt manuell und bringt Unstetigkeiten mit sich. Ein Start- bzw. Endwert der elektrischen Belastung bei exakt 0 V soll sichergestellt werden.

Des Weiteren gilt es zu beachten, dass eine Spannungsausregelung direkt am Bauteil eine zwingende Erhöhung der Vergleichskapazität obsolet macht. Es muss jedoch gesagt werden, dass ein hoher Spannungsabfall an der Vergleichskapazität entsprechende Spannungsquellen mit höheren Spannungsniveaus nötig macht, um eine definierte elektrische Feldstärke am Bauteil anzulegen. Aus diesem Grunde wurde im Laufe der vorliegenden Arbeit die Vergleichskapazität gesteigert.

1.1 Aufbau der Arbeit

Das Hauptaugenmerk dieser Diplomarbeit liegt in der Etablierung einer hinreichend präzisen, automatisierten elektronischen Regelung der Prüfspannung am Bauteil. Im Vorfeld wurde allerdings, ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit, eine Erhöhung der Vergleichskapazität in der Messschaltung vorgenommen. Die somit erzielten Verbesserungen der Aktoren-Prüfung wurden jedoch nicht in zwei Kapitel, welche die Methoden direkt gegenüberstellen, untergliedert. Dies geschah aufgrund der Tatsache, dass die Verwendung einer Ausregelung mittels LabVIEW eine Erhöhung der Vergleichskapazität nicht zwingend erfordert. Im Rahmen der Verifikation der LabVIEW-Regelung wurden allerdings sämtliche zur Verfügung stehenden Messmethoden bzw. Messaufbauten gegenübergestellt, um eine prozentuelle Abschätzung der effektiv wirksamen elektrischen Spannungen am Bauteil zu ermöglichen.

Das Kapitel 5 dieser Arbeit, welches sich ausschließlich den Versuchen widmet, teilt sich in zwei Unterkapitel. Im ersten soll die Verbesserung via LabVIEW-Ausregelung an einem Piezo-Aktor mit einer Kapazität der Größenordnung von $10\mu\text{F}$ verifiziert werden. Das zweite Kapitel zeigt die direkte Gegenüberstellung einer Piezo-Aktoren Prüfung der Serie B, die aufgrund der 10fach höheren Kapazität dieser Aktoren, eine erhebliche Abweichung zwischen neuer und alter Methode zeigen soll.

2 Allgemeine Grundlagen

Der durch diese Arbeit zu verbessernde Prüf- bzw. Messaufbau hat die Aufgabe z.B. den mechanischen Hub in Abhängigkeit der angelegten elektrischen Spannung sowie diverse andere Charakteristika von Piezo-Aktoren zu bestimmen. Durch die in diesem Kapitel abgehandelten Grundlagen sollen die werkstofftechnischen und physikalischen Grundlagen des bei Aktoren verwendeten Materials erläutert bzw.

vertieft werden. Weiters soll aufgeklärt werden, warum eine Prüfung der elektromechanischen Kennwerte unter verschiedenen Randbedingungen unerlässlich ist. Es wird im Speziellen auf den Werkstoff Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) eingegangen, der zurzeit auf dem Sektor der piezogestützten Einspritzsysteme, aufgrund sowohl physikalisch-technischen Eigenschaften als auch wirtschaftlicher Gesichtspunkte, vorrangig zum Einsatz kommt.

2.1 Piezoelektrizität

Piezoelektrizität beschreibt das Auftreten von elektrischen Ladungen (bzw. Spannungen) durch eine Deformation (bzw. mechanische Spannung), wobei die Größe der auftretenden Ladung von der Stärke der Kraft abhängt. Quarz, Turmalin, Seignettesalz, Zinkblende etc. besitzen diese Eigenschaft. [Dud, S330] Bei Betrachtung von Kristallen im Speziellen, zeigen alle polaren Kristalle Piezoelektrizität, da eine aufgebrachte mechanische Spannung eine durch die elastischen Eigenschaften bestimmte Dehnung hervorruft. Diese Dehnung beeinflusst die Polarisierung, da die Polarisierung durch die Verschiebung der Ionen hervorgerufen wird.

Der Zusammenhang, in lediglich einer Dimension, zwischen mechanischer und elektrischer Polarisierung lässt sich folgendermaßen beschreiben: [Nye, S110]

$$P = d \cdot \sigma$$

Formel 2.1

σ ...mechanische Spannung [Nm^{-2}]

d ...piezoelektrischer Koeffizient [CN^{-1}]

P ...Polarisation [Cm^{-2}]

Diese Beziehung wird auch „Direkter Piezoelektrischer Effekt“ genannt. Aufgrund der piezoelektrischen Eigenschaft von polaren Materialien kann auch ein „Indirekter Piezoelektrischer Effekt“ beobachtet werden (hier wiederum explizit für eine

Dimension), welcher bei Anlegen eines elektrischen Feldes eine Dehnung hervorruft. [Nye, S115]

$$\varepsilon = d \cdot E$$

Formel 2.2

ε ...Dehnung []

d ...piezoelektrischer Koeffizient [CN⁻¹]

E ...elektrische Feldstärke [Vm⁻¹]

Der Direkte Piezoelektrische Effekt findet bei mechanischen Sensoren Anwendung, der Indirekte Piezoelektrische Effekt bei Aktoren. Ein möglichst großer piezoelektrischer Koeffizient ist bei Materialien, deren Aufgabe die Erzeugung von Vibration bzw. Bewegung ist, wünschenswert. [Jaf, S8] Als Beispiele können hierzu z.B. Quarz als Vertreter mit einem kleinen [Nye, S125-126] und Blei-Zirkonat-Titanat als Vertreter mit einem gigantischen Piezoelektrischen Koeffizienten [Mou, S367] genannt werden. Im Allgemeinen (in drei Dimensionen) sind P und E Vektoren, ε und σ Tensoren zweiten Grades und somit der Piezoelektrische Koeffizient d ein Tensor dritten Grades. Die große Anzahl an Komponenten dieses Tensors wird durch Symmetrien, welche auch in diversen Datenblättern (z.B. der Firma PI Ceramic GmbH) aufscheinen, erheblich reduziert. Für Materialien wie z.B. gepolte ferroelektrische Keramiken bleiben nur 3 mögliche, unterschiedliche Koeffizienten für d .

Die parallele Komponente d_{33} :

Diese Komponente besagt die Polarisation durch das Anlegen einer mechanischen Spannung in derselben Richtung oder die Dehnung in die Richtung, in der ebenfalls ein elektrisches Feld angelegt wird.

Die Normal-Komponente d_{31} :

Hier wird die Polarisation bei Anlegen einer mechanischen Spannung betrachtet, welche im Winkel von 90° aufgebracht wird, oder die Dehnung bei Anlegen eines elektrischen Feldes im rechten Winkel zur Dehnungsrichtung.

Die Schub-Komponente d_{15} :

In diesem Fall wird die Polarisierung durch Anlegen einer mechanischen Schubspannung beschrieben oder die Entstehung einer Schubspannung durch das Anlegen eines elektrischen Feldes. [Del, S80]

Ebenso bewirkt eine Veränderung der Temperatur eine Änderung der Oberflächenladung und somit auch der spontanen Polarisierung. Dieser Effekt wird Pyroelektrizität genannt. [Del, S83]

2.2 Pyroelektrizität

Pyroelektrizität bezeichnet die Eigenschaft ferroelektrischer Materialien, bei einer Temperaturänderung eine Änderung der Polarisierung aufzuweisen. Alle pyroelektrischen Materialien zeigen (nur wenn gepolt) piezoelektrische Eigenschaften. Piezoelektrika müssen aber wiederum keine pyroelektrischen Eigenschaften besitzen, da Pyroelektrika polar sein müssen. Obwohl die Pyroelektrizität bei piezoelektrischen Anwendungen Störungen erzeugt, werden trotzdem Materialien verwendet, die sowohl piezoelektrisch als auch pyroelektrisch sind, da sie zu den anwendungstechnisch sensitivsten Materialien gehören. [Del, S83]

$$\Delta P = p_i \Delta T$$

Formel 2.3

ΔP ... Änderung der Polarisierung [Cm^{-2}]

p_i ... pyroelektrischer Koeffizient [$\text{Cm}^{-2}\text{K}^{-1}$]

ΔT ... Änderung der Temperatur [K]

2.3 Ferroelektrizität

Ferroelektrizität bezeichnet eine Eigenschaft eines Werkstoffes, der über einen bestimmten Temperaturbereich spontane Polarisation zeigt, wobei die Polarisationsrichtung von einem äußeren elektrischen Feld veränderbar ist. Die Möglichkeit eines Kristalls zur spontanen Polarisation ist auf die Kristallsymmetrie zurückzuführen. Von den 32 möglichen Punktgruppen, die sämtliche Kristallsysteme beschreiben, sind 11 zentrumsymmetrisch und besitzen ein Inversionszentrum. Bei Strukturen dieser Art sind polare Eigenschaften ausgeschlossen, da jeder polare Vektor durch eine bestehende Symmetrie-Transformation invertiert werden kann. Bei den verbleibenden 21 Punktgruppen ohne Inversionszentrum zeigen alle bis auf eine Punktgruppe piezoelektrische Eigenschaften. Eine von außen erzeugte Dehnung führt zu einer Änderung der elektrischen Polarisation. Unter den 21 Punktgruppen ohne Inversionszentrum befinden sich 10 mit einzelner polarer Achse. Diese Kristalle können spontane Polarisation parallel zu dieser Achse zeigen. [Mou, S18]

Ein Beispiel hierzu ist Bariumtitanat in tetragonaler Phase. In kubischer Phase andererseits dient das zentral gelegene Titan-Ion als Inversionszentrum und schließt die spontane Polarisation aus. Nur bei Auftreten einer tetragonalen Verzerrung, bei der die Kationen von Barium und Titan in Bezug auf die Sauerstoff-Anionen verschoben werden, wird eine polare Achse genau in die Richtung der tetragonalen Deformation erzeugt, die wiederum die Richtung der spontanen Polarisation festlegt. Die spontane Polarisation ist mit der Oberflächenladung wie folgt verknüpft [Mou, S54]

$$P_s = \sigma_p$$

Formel 2.4

P_s ...spontane Polarisation [Cm^{-2}]

σ_p ...Oberflächenladung [Cm^{-2}]

Für gewöhnlich werden Oberflächenladungen durch äußere Ladungen kompensiert.

Diese Polarisation kann durch Anlegen eines elektrischen Feldes verändert werden. Die durch ein elektrisches Feld neu ausgerichtete Polarisationsrichtung bleibt auch nach Entfernen des elektrischen Feldes bestehen. Diese Eigenschaft trennt ferroelektrische von piezoelektrischen Materialien. Bei piezoelektrischen Medien springt die Polarisationsrichtung nach Entfernen des elektrischen Feldes in den Ursprungszustand zurück. Sämtliche ferroelektrischen Materialien besitzen sowohl pyroelektrische als auch piezoelektrische Eigenschaften.

Wie schon angesprochen, haben ferroelektrische Werkstoffe nur in einem bestimmten Temperaturbereich, welcher werkstoffs- bzw. legierungsabhängig ist, die Fähigkeit zur spontanen Polarisation. Oberhalb einer definierten Temperatur, der Curie-Temperatur, bildet sich aus der nicht zentrumssymmetrischen und somit polaren Phase eine Hochtemperaturphase aus, welche zentrumssymmetrisch, unpolar und paraelektrisch ist. In Abbildung 1 ist die Polarisation in Abhängigkeit der Temperatur am Beispiel von Bariumtitanat zu sehen.

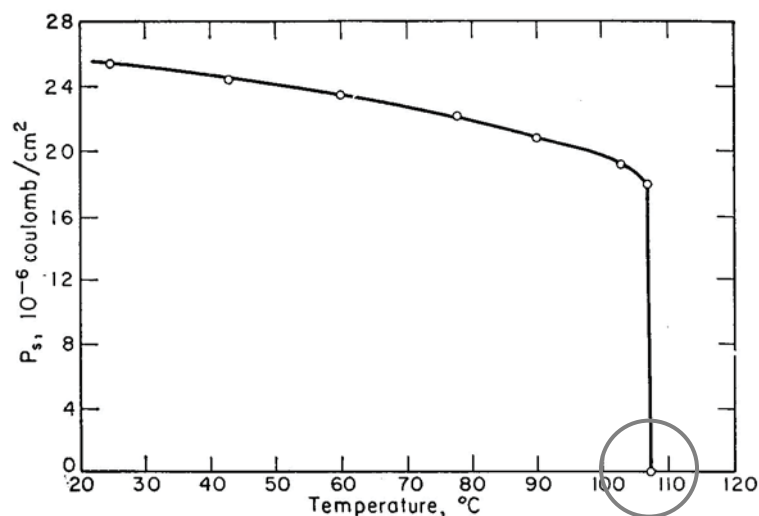


Abbildung 1: Spontane Polarisation von Bariumtitanat (BaTiO_3) als Funktion der Temperatur; die Curietemperatur und der einhergehende Abfall auf 0 Cm^{-2} ist durch den grauen Kreis gekennzeichnet

[F. Jona, G. Shirane, (1993), Ferroelectric Crystals, S116]

Beim Übergang zur Niedertemperaturphase verschieben sich die Ionen in Bezug auf die Einheitszelle und erzeugen dadurch einen Dipol. Die aufgerechnete Netto-Dipolmomentdichte im Vergleich zum paraelektrischen Zustand ergibt die spontane Polarisation. Je weiter man sich der Curietemperatur von unten kommend nähert,

desto geringer muss ein angelegtes elektrisches Feld sein, um die Polarisierung des Materials zu verändern. Dies beruht auf der im Übergangsbereich auftretenden Weichheit des Kristallgitters. Die Beziehung zwischen beaufschlagtem elektrischem Feld und der Polarisierung nimmt die Form einer Hystereseschleife an. Aus diesem Grund entsteht eine Analogie zu ferromagnetischen Materialien, bei denen die Beziehung zwischen Magnetisierung und magnetischem Feld ebenfalls eine Hystereseschleife erzeugt, und somit der Gruppe der ferroelektrischen Werkstoffe als Namensgeber dient. Ferroelektrische Materialien sind sowohl ein- als auch polykristallin anzutreffen, wobei die polykristalline Form in unserem Fall vorteilhafter ist. Der Einkristall kann durch Polung zu einem einzel-domänen Material gewandelt werden. Sämtliche ausgelenkten Ionen zeigen in dieselbe Richtung. Im Gegensatz dazu besitzt der Polykristall Körner, in denen wiederum Domänen unterschiedlicher Ausrichtung sitzen. Typischerweise ist Piezokeramik im Zustand direkt nach dem Sinterprozess (ohne jede weitere Nachbehandlung) makroskopisch unpolar und nicht piezoaktiv, weil die Domänenorientierungen im Mittel gleichverteilt sind. Durch Polung, die in diesem Fall ein ausreichend starkes elektrisches Feld erfordert, kann aus diesem isotropen Material ein polares Material mit piezoelektrischen Eigenschaften erzeugt werden. Ein weiterer Vorteil der polykristallinen Keramik gegenüber den Einkristallen ist der geringere Aufwand bei der Herstellung. Technologisch wichtige Vertreter der ferroelektrischen Materialien sind Perowskite. Die Strukturformel der Perowskite ist ABO_3 , wobei A ein großes Kation (z.B. Ba^{2+} , Pb^{2+}), B ein mittelgroßes Kation (z.B. Ti^{4+} , Zr^{4+}) ist und O für das Sauerstoffanion steht. Im paraelektrischen Zustand besitzt das A Kation 12 Sauerstoffanionen als direkte Nachbarn im Kristallgitter und die B Kationen besetzen die vorhandenen Oktaederlücken. Die am dichtesten gepackte kubische Struktur hat ein kubisch-flächenzentriertes Gitter und besitzt demnach in unserem Fall die Zusammensetzung ABO_3 , siehe Abbildung 2.

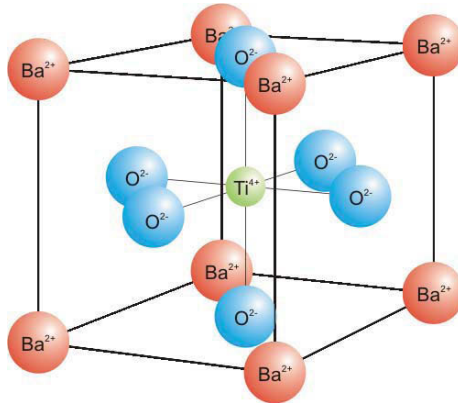


Abbildung 2: Bariumtitanat-Einheitszelle (BaTiO₃).

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/87/Kubische_Phase_von_Bariumtitanat.png,
20.07.2011]

In Bezug auf die dichtest mögliche Packung müssen die Ionenradien folgende Bedingung erfüllen:

$$R_A + R_O = 2(R_B + R_O)$$

Formel 2.5

R_A ... Radius Kation A [m]

R_B ... Radius Kation B [m]

R_O ... Radius Sauerstoff-Anion [m]

Jedoch muss gesagt werden, dass im Fall des Perowskit-Verbundes diese Bedingung nur eingeschränkte Gültigkeit besitzt, da kleine Änderungen der Radien durchaus zulässig sind. Um diese Abweichung zu berücksichtigen, muss die vorhergehende Formel durch den so genannten Toleranzfaktor „ δ “ erweitert werden:

$$R_A + R_O = 2\delta(R_B + R_O)$$

Formel 2.6

Dieser Toleranzfaktor bewegt sich in der Größenordnung von 0,95 und 1,06.

[Del, S65-67]

2.4 Domänen und deren Verhalten

Die Domänen eines ferroelektrischen Materials entstehen durch die Minimierung der elektrostatischen Energie des Depolarisierungsfeldes, welches durch die Verschiebung des Kations von der zentrumsymmetrischen zur nicht zentrumsymmetrischen Phase unter dem Curiepunkt entsteht. Die Gesamtheit aller in dieselbe Richtung ausgerichteten und gleichzeitig benachbarten Einheitszellen werden zu einer Domäne zusammengefasst. Die Trennung zwischen zwei Domänen, die somit unterschiedliche Ausrichtung besitzen, wird als Domänenwand bezeichnet und besitzt eine Dicke zwischen 1 und 10 nm. Die möglichen Auslenkungen des Kations und die Ausrichtungen der Domänen sind kristallstrukturabhängig. So können bei tetragonalen Einheitszellen 180° und 90° zueinander ausgerichtete Domänen entstehen, bei rhomboedrischen Phasen 71° und 109° .

Die Domänen können entweder durch ein elektrisches Feld (Ferroelektrizität) oder mechanische Spannung (Ferroelastizität) ausgerichtet werden, was wiederum ein Bewegen von Domänenwänden voraussetzt, und somit dem Material piezoelektrische Eigenschaften verleiht (siehe Abbildung 3). Durch die Existenz der Domänen, deren Dipole sich gegenseitig innerhalb eines Kornes aufheben, ist die Symmetrie eines Polykristalls höher als die des Einkristalls. Die Symmetrie steigt somit mit zunehmender Kornanzahl (Kornfeinung) durch die zufällige Ausrichtung jedes Kornes. Um diesem polykristallinen, piezoelektrischen Material eine Vorzugsrichtung vorzugeben, muss man ein ausreichend großes elektrisches Feld anlegen. Die einzelnen Domänen richten sich hierbei nach dem elektrischen Feld aus, das heißt, sie drehen ihren Polarisationsvektor in eine Position, die der Richtung des angelegten elektrischen Feldes am nächsten kommt. Dieser Prozess wird Polung genannt und ist ausschließlich bei ferroelektrischen Medien möglich. Bei lediglich piezoelektrischen Materialien nehmen die Polarisationsvektoren nach Entfernen des elektrischen Feldes wieder ihre ursprüngliche Richtung ein. Die minimale Feldstärke, die zum Auslenken der Vektoren benötigt wird, ist die Koerzitivfeldstärke. [Del, S70-72]

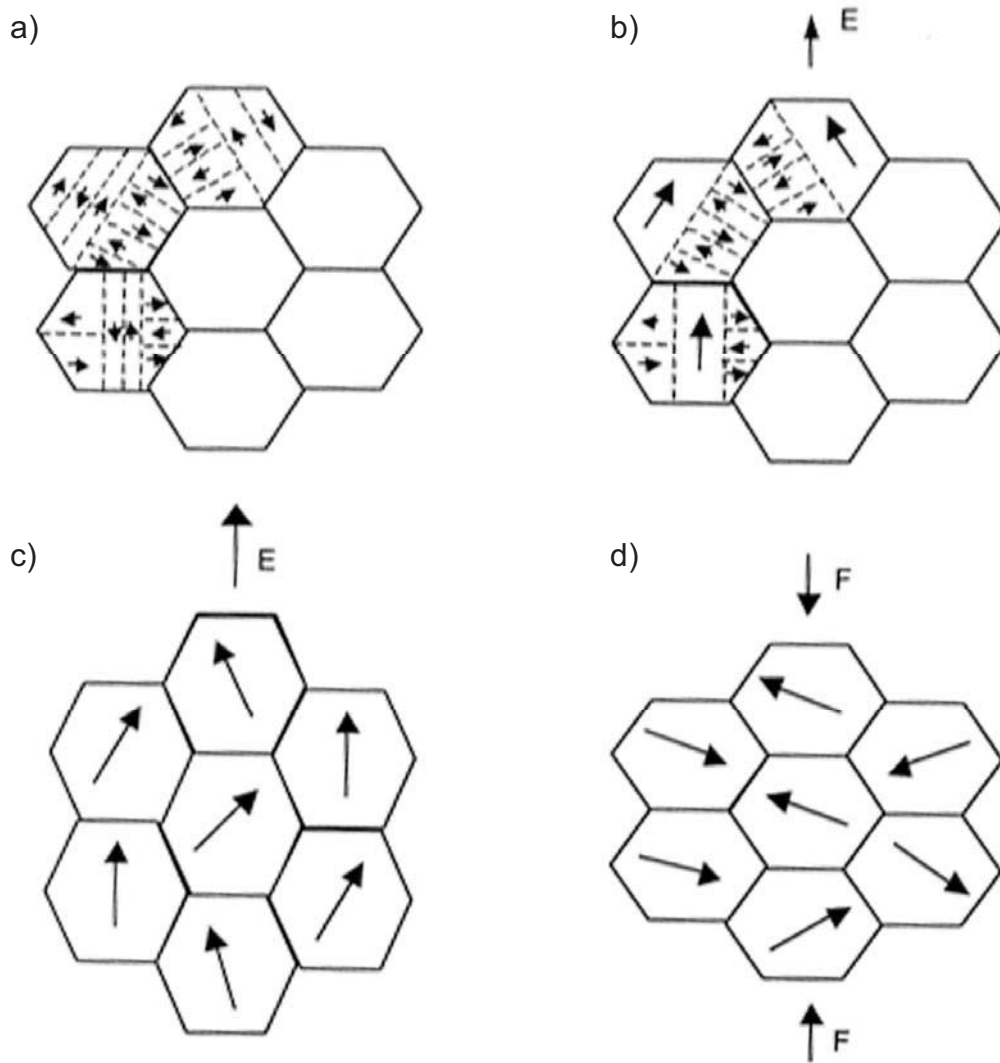


Abbildung 3: a) Zufällige Ausrichtung der ferroelektrischen Domänen.

b) 180° Klappen durch ein schwaches elektrisches Feld.

c) 90° Klappen nahe der Koerzitivfeldstärke, die Polarisationsvektoren folgen weitgehend dem äußeren elektrischen Feld

d) Effekt einer zusätzlichen Druckspannung (Kraft F) auf die Domänenstruktur, die Polarisationsvektoren werden weitgehend normal zur Kräfteinleitungsrichtung gedrängt.

[Deluca, (2009), Raman spectroscopy for the non-destructive investigation of crystallographic orientation and residual stress in ferroelectric ceramics, S72]

2.5 Der Werkstoff PZT: Blei-Zirkonat-Titanat

PbTiO_3 besitzt die gleiche Struktur wie BaTiO_3 , allerdings ist bei Raumtemperatur die c-Achse der tetragonalen Struktur um 6 % länger als die a-Achse. Die

Curietemperatur liegt bei 495 °C. Durch das Abkühlen der gesinterten Keramik unter die Curietemperatur beim Herstellungsprozess, entstehen hohe Eigenspannungen im Bauteil, die durchaus zur Zerstörung führen können. Im Gegensatz dazu bildet PbZrO_3 die orthorombische Struktur aus, ist ein Antiferroelektrikum und der Curiepunkt liegt bei 234 °C. Bei einem Antiferroelektrikum richten sich die durch die Auslenkung des Zr^{4+} Ions aus dem geometrischen Zentrum (gebildet aus den 6 O^{2-} Ionen) erzeugten Dipole immer abwechselnd in genau entgegengesetzte Richtung aus. Die spontane Polarisierung ist somit Null. [Mou, S364-365]

Blei Zirkonat Titanat, $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ mit $x=0,52-0,54$, ist die am meisten verwendete Keramik. PZT ist eine Legierung aus Blei Titanat und Blei Zirkonat. An der morphotropen Phasengrenze (Zirkon zu Titan Verhältnis von 53 : 47 bei Raumtemperatur) tritt ein Übergang von der zirkonreichen rhomboedrischen und der titanreichen tetragonalen Phase auf. PZT mit einer Zusammensetzung dieser morphotropen Grenze zeigen den höchsten piezoelektrischen Ladungskoeffizienten d_{33} , elektromechanischen Kopplungsfaktor und auch die höchste Dielektrizitätskonstante. [Set, S8]

2.5.1 Grundzüge der Herstellung von PZT

Zur Herstellung von PZT Bauteilen wird die Pulvermethode verwendet. Die besten Werte werden bei richtigen stöchiometrischen Zusammensetzungen, einem minimalen Anteil von Flussmittel und anderer Verunreinigungen und natürlich einer maximalen Dichte in Bezug auf den Sintervorgang erzielt. Der Grad an Verunreinigungen im Pulver wird durch auf Zirkon basierenden Mahlkörpern in der Pulveraufbereitung gering gehalten.

Die meisten der heutzutage verwendeten Zusammensetzungen beinhalten PbO als Hauptbestandteil. Trotz der Flüchtigkeit oberhalb von 800 °C, muss das PbO bis zur Sintertemperatur von 1300 °C mittels kontrollierter Atmosphäre eingedämmt werden. Das Kalzinieren erfolgt in verschließbaren Gefäßen aus Al_2O_3 . Vor dem Sintervorgang wird der Rohling mit einem stark bleihaltigem Pulver wie z.B. PbZrO_3 umgeben und wiederum in Schiffchen (Brennkapseln) platziert. Durch den

eingeschränkten Austausch mit der Atmosphäre und der leichten Reduzierbarkeit von PbO zu metallischem Blei, müssen sämtliche organischen Bestandteile für die Vorsinterung an Luft bei 600 °C entfernt werden. Das finale Sintern wird im Anschluss in elektrischen Brennöfen durchgeführt. Trotz der Vorkehrungen ist ein Verlust von 2-3 % des gesamt PbO Gehaltes zu erwarten. Dieser Schwund wird jedoch schon von vornherein durch zusätzliche Beigaben von PbO zu den Ausgangsmaterialien kompensiert.

Einfache Bauteilgeometrien werden über das Gesenkpressen, längliche Körper durch Extrusion, dünne Platten mittels Bandgießen oder Kalandrieren und große Ringe durch Anwendung des Schlickergießens geformt.

Das gesinterte Produkt hat eine theoretische Dichte größer 95 % und eine Kristallitgröße im Bereich von 5-30 µm. Sowohl Falschluff als auch der Ausfall von PbO schlagen sich in geminderten piezoelektrischen Eigenschaften nieder. Aus diesem Grund ist eine sorgfältige Kontrolle und Einhaltung aller Punkte im Herstellungsprozess erforderlich.

Die Elektroden werden nach einer möglicherweise benötigten Nachbearbeitung aufgebracht. Für den größten Teil aller Anwendungen wird ein speziell entworfener Silber-Grundierungslack aufgetragen und anschließend bei 600-800 °C eingebrannt. Im Falle von sehr dünnen Bauteilen werden Ni-Cr oder Gold Elektroden durch Sputtern oder Aufdampfen installiert.

Für den Polungsprozess werden die Proben bevorzugt in Transformatoröl getaucht und bei 100-150 °C mit einem elektrischen Feld der Stärke 1-4 kVmm⁻¹ beaufschlagt. Bei BaTiO₃ muss dieses Feld solange aufrechterhalten werden, bis die Probe 50 °C unter die Curietemperatur abgekühlt ist. Bei PZT werden Temperatur und elektrisches Feld soweit optimiert, um einerseits einen maximalen piezoelektrischen Koeffizienten und andererseits die Leckströme in für das Bauteil thermischen und elektrisch verträglichen Grenzen zu erhalten. Stärkere elektrische Felder können durchaus verwendet werden, müssen allerdings in einer Reihe von kurzen Impulsen aufgebracht werden. [Mou, S361-362]

2.5.2 Additive für PZT: „Harte“ und „Weiche“ PZT

Die Substitution einer geringen Menge (~1 %) der PZT Kationen durch andere Kationen verändert die elektrischen Eigenschaften. Durch diese Methode können PZT Keramiken für die für sie vorgesehenen Anwendungen optimiert werden.

Das „Dopen“ durch Kationen niedriger Valenz, „Akzeptoren“, (z.B. Fe^{3+} für Ti^{4+} oder Zr^{4+} ; Na^{1+} für Pb^{2+}) resultiert in Sauerstoff Leerstellen. Die Sauerstoffleerstellen können allerdings im Sauerstoff-Untergitter wandern und formen mit Hilfe der Substitutionskationen Dipole. Diese Dipole richten sich nach dem Polarisationsvektor der jeweiligen Domäne aus und erzeugen interne Felder, die die Konfiguration der Domäne stabilisieren und die Beweglichkeit der Domänenwände einschränken. Die PZT Keramik wird dadurch weniger reaktiv, aber dafür stabiler. Somit sinken die piezoelektrischen Konstanten, die Koerzitivfeldstärke steigt und Q_m (der mechanische Qualitätsfaktor) ist höher. Die Dielektrizitätskonstante und somit auch die dielektrischen Verluste sind aufgrund der eingeschränkten Mobilität der Domänenwände geringer, obwohl der elektrische Widerstand ebenfalls reduziert ist. Akzeptor gedoppte PZT Keramiken werden deswegen „harte“ PZTs genannt. Sie sind für diverse Applikationen wie z.B. Hochleistungs- und Hochspannungsanwendungen äußerst geeignet.

Durch das Substituieren mit Kationen höherer Valenz, „Donoren“, wie z.B. Nb^{5+} für $\text{Ti}^{4+}/\text{Zr}^{4+}$; La^{3+} für Pb^{2+} wird die Beweglichkeit der Domänenwände verbessert. Das Dopen mit Donoren erzeugt den gegenteiligen Effekt wie mit Akzeptoren. Piezoelektrische Koeffizienten und Permittivität werden verbessert, während elastische Steifigkeit, Koerzitivfeldstärke und der mechanische Qualitätsfaktor Q_m sinken. Dielektrizitätsverluste werden gesteigert, die elektrische Leitfähigkeit vermindert. Das Material ist aus elektrischer und mechanischer Sicht „weicher“. Verwendung findet es im medizinischen Sektor für Messfühler und hochempfindliche Drucksensoren. Der Vergleich von harter und weicher PZT-Keramik wird in den Hysteresekurven der Abbildung 4 veranschaulicht. Isovalente Substitutionen wie z.B. Ca^{2+} oder Sr^{2+} für Pb^{2+} oder Sn^{4+} für $\text{Ti}^{4+}/\text{Zr}^{4+}$ werden zur Verringerung der Curietemperatur verwendet bei gleichzeitiger Steigerung der Permittivität bei Raumtemperatur. [Set, S8-9]

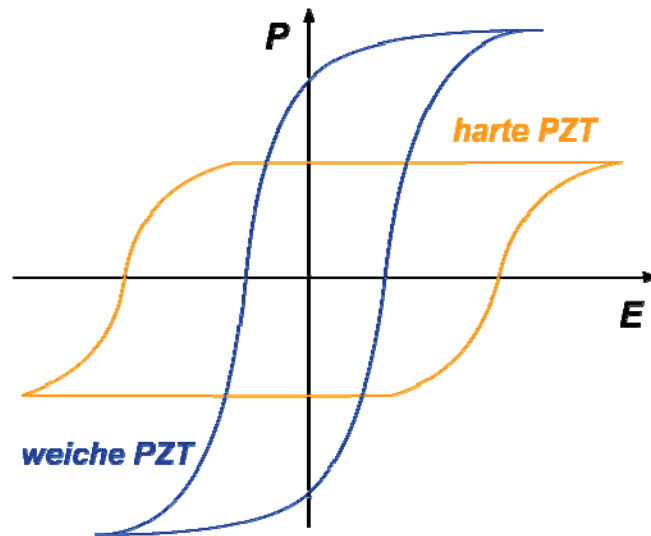


Abbildung 4: Polarisation P über elektrischer Feldstärke E, Hysteresekurve für harte und weiche PZT
 [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Hysterese_PZT.png&filetimestamp=20060530053546,
 20.07.2011]

2.6 Multilayer-Aktoren auf Basis PZT

2.6.1 Allgemein

Ausgehend von einer PZT-Keramik wird der Piezoelektrische Effekt definiert durch die Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie. Um eine signifikante Dehnung von mehreren Promille dieser Aktoren zu erreichen, wird ein elektrisches Feld größer 2 MVm^{-1} benötigt. Nur dadurch können Großsignal-Effekte, die durch die Ausrichtung der 90° Domänenwände hervorgerufen werden, erzeugt werden. Die effektive elektrische Feldstärke im Piezo-Aktor E_{Stack} wird wie folgt errechnet [Fac, S59]:

$$E_{Stack} = \frac{U_{Stack}}{l}$$

Formel 2.7

E_{Stack} ... elektrische Feldstärke [Vm^{-1}]

U_{Stack} ... elektrische Spannung am Stack [V]

l ... Abstand der Elektroden [m]

Da jedoch das Bauteil mit einer elektrischen Spannung $U_{Stack} < 200 \text{ V}$ (generiert durch Standardelektronik) betrieben werden soll, hat laut Formel 2.4 die Schichtdicke l herabgesetzt zu werden. Die moderne Multilayer-Technologie, deren Aufbau in Abbildung 5 ersichtlich ist, ist in der Lage, diese geforderten Schichtdicken zu generieren. Es muss noch erwähnt werden, dass obwohl die vorhin beschriebene piezoelektrische Antwort stark nichtlinear ist, das elastische Verhalten des Bauteiles global gesehen linear bleibt. [Del, S43]

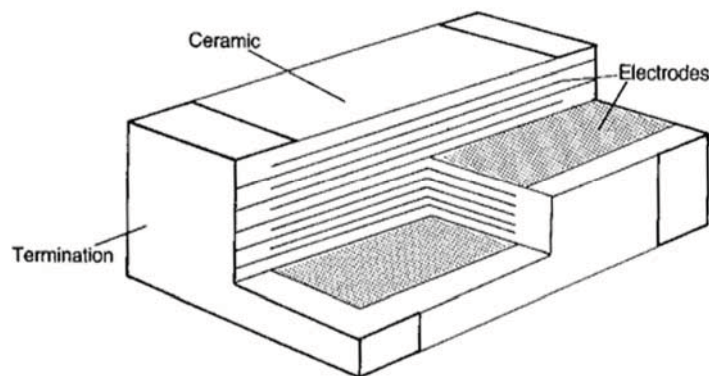


Abbildung 5: Multilayer-Schichtbauweise

[Deluca, (2009), Raman spectroscopy for the non-destructive investigation of crystallographic orientation and residual stress in ferroelectric ceramics, S78]

2.6.2 Allgemeiner Aufbau und Eigenschaften

Durch die Zusammenschaltung der Layer-Elektroden an den Ecken des Multilayer-Bauteils, dem sogenannten „Stack“, sind lediglich nur sehr geringe Bereiche im Inneren eines Stacks zur elektrischen Trennung der positiven und negativen Elektroden nötig.

Die daraus hervorgehenden, in Abbildung 6 ersichtlichen, inaktiven Regionen des Aktors halten sich ebenfalls in Grenzen. Aus diesem Grund war es möglich auf der einen Seite Zuverlässigkeitsprobleme, die mit der Größe der inaktiven Bereiche steigen, zu vermeiden und andererseits die günstige Standard Multilayer-Herstellungstechnologie anzuwenden. Die in Dieseleinspritzsystemen zur Anwendung kommenden Stacks mit den Abmessungen von ca. $7 \times 7 \times 30 \text{ mm}^3$ werden in Polymer eingebettet und besitzen ca. 360 Lagen mit jeweils $80 \mu\text{m}$ Dicke. Sie zeigen einen hohen piezoelektrischen Ladungskoeffizienten d_{33} von 700 pm/V und eine relative Dehnung von $1,4 \cdot 10^{-3}$ bei einer elektrischen Feldstärke von 2 kV/mm . Die Sinter Temperatur für Standard PZT Keramik mit einer hohen Curietemperatur von $335 \text{ }^\circ\text{C}$ konnte ausreichend reduziert werden, um dichte Multilayer-Stacks durch drucklose Sinterung zu verwirklichen.

Dadurch konnte eine sehr kleine Temperaturabhängigkeit der Dehnung im Bereich von -40 bis $150 \text{ }^\circ\text{C}$ und eine geringe Frequenzabhängigkeit bis zu 10 kHz erreicht werden. Auch bei Überlagerung mit statischer mechanischer Belastung können selbst unter härtesten Arbeitsbedingungen (Schaltzeit $50 \mu\text{s}$ im bipolaren Betrieb, elektrische Feldstärke 2 kV/mm) eine Lebenserwartung von mehr als 10^9 Zyklen garantiert werden. [Wer, S60]

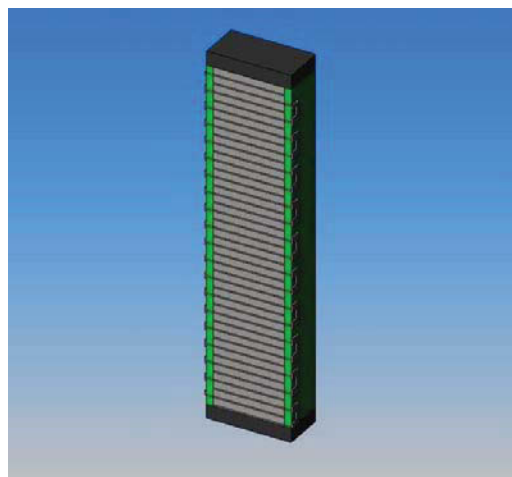


Abbildung 6: Aufbau Piezo-Multilayer-Stack, die grünen Randbereich kennzeichnen die inaktiven Bereiche

[<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Piezostack.jpg&filetimestamp=20060308091016>, 20.07.2011]

2.6.3 Herstellung von Aktoren

Die Vielschicht- bzw. Multilayer-Technologie wurde schon vor Jahrzehnten für die Herstellung von Multilayerkondensatoren entwickelt. Jedoch würden die sehr hohen Sintertemperaturen von PZT die Verwendung von Platinelektroden erfordern, was aber wiederum ökonomisch nicht vertretbar wäre. Aus diesem Grund wurde nach anderen Wegen zur Einbringung der inneren Leiter bzw. Elektroden wie z.B. der Ausnutzung des Metall-Injektionsprozesses gesucht. Eine weitere Möglichkeit wäre die Absenkung der Sintertemperatur unter 1130 °C mittels Optimierung der Pulvermorphologie, der Zugabe von Sinteradditiven und der Durchführung eines kontrolliert ausgelegten Sinterprozesses.

Obwohl kommerziell genutzte monolithische Aktoren seit über zehn Jahren verfügbar sind und in zahlreichen Einsatzgebieten Anwendung finden, war dieser Technologie ein wirklicher Durchbruch verwehrt. Zumindest bis zu dem Zeitpunkt an dem nach einem in großer Stückzahl verfügbares, neuartiges piezoelektrisches Multilayerbauteil verlangt wurde. Diese bauteilhungrige Anwendung ist die durch piezoelektrische Multilayer-Aktoren getriebene Kraftstoffeinspritzung bei Dieselmotoren. So gelang es einen Multilayer-Aktor herzustellen, der sowohl die elektrischen als auch mechanischen Anforderungen erfüllte und in Bezug auf Verlässlichkeit, Lebensdauer und vor allem zu vertretbaren Produktionskosten hin optimiert wurde. [Wer, S59-60]

2.6.4 Aufbau eines Piezo-Aktors

Die zu prüfenden Standard-Piezo-Aktoren, in der vorliegenden Arbeit als „Serie A“ bezeichnet, werden vom Hersteller, vom fertigungstechnischen Standpunkt aus gesehen, einsatzfähig geliefert. Der Piezostack-„Rohling“ mit den Abmessungen 6,9x6,9x30,1 mm³ und einer Kapazität von ca. 10 µF ist somit vom Hersteller gepolt und sitzt in einer eigens dafür ausgelegten, zylindrischen Kunststoff-Topfhülse. Diese Hülse besitzt einen Boden mit einer quadratischen Ausnehmung zur formschlüssigen Aufnahme des Piezo-Aktors sowie 2 Löcher für die Herausführung der elektrischen Kontakte. Diese Kontakte, sogenannte „Pins“, ragen, parallel zu Stack und

Topfhülse, in das Bauteil. Die Verbindung zwischen den Elektroden, welche jeweils eine gesamte Quaderfläche darstellt, und dem dazugehörigen Pin erfolgt nicht über einen singulären Kontakt, sondern durch viele feinste Drähte. Die Konstruktion wird in optischer Anlehnung „Harfe“ genannt. Da im Betrieb an der Elektroden-Anschlussfläche Risse auftreten können und die Folge inaktive Bereiche des Stacks wären, kann die Harfe die vollständige Spannungsversorgung und somit Funktionstüchtigkeit gewährleisten. Der Raum zwischen Piezostack und der Topfhülse wird mit Silikon gefüllt. Das obere Ende der Topfhülse wird mit einem Deckel, der ebenso dieselbe Ausnehmung wie der Boden besitzt und aus demselben Material wie die Topfhülse besteht, verschlossen.

Die Piezo-Aktoren mit höherer Kapazität besitzen denselben Aufbau wie die Standard-Piezo-Aktoren. Mit den Abmessungen 11,8x11,8x54,2 mm³ sind sie jedoch erheblich voluminöser als ihre kleineren Verwandten, besitzen somit eine erhöhte Kapazität von ca. 100 µF und werden in dieser Arbeit als „Serie B“ bezeichnet. Abbildung 7 zeigt Aktoren verschiedenster Geometrie aus der Produktpalette von EPCOS.

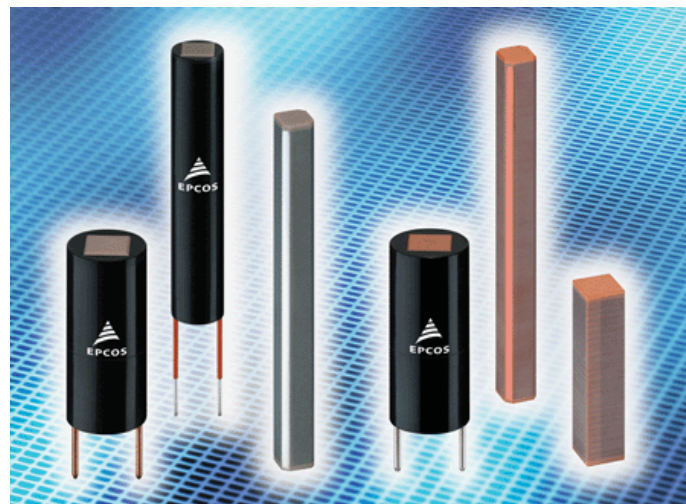


Abbildung 7: Größenvergleich verschiedener Produkte mit unterschiedlichen Geometrien und Kapazitäten von EPCOS, die drei schwarzen, gekapselten Bauteile mit den Anschlusspins sind einsatzfähig, bei den anderen drei „nackten“ Bauteilen handelt es sich um Piezostack-Rohlinge
[<http://i.cmpnet.com/automotivedesign-europe/2009/09/Epcos/PPPI.gif>, 19.09.2011]

3 Mechanische Prüfung von Aktoren

Zu Beginn wird der elektromechanische Prüfstand am Institut für Struktur- und Funktionskeramik/Montanuniversität vorgestellt und im Anschluss die einzelnen Komponenten und deren Notwendigkeit bzw. Anforderungen beschrieben. Es wird ebenfalls detailliert auf die Problematik der Bauteilprüfung von Piezo-Aktoren, wie schon in der Einleitung erwähnt, eingegangen. Stellvertretend wird ebenfalls ein vollständiger Prüfablauf erläutert.

Es gilt zu beachten, dass sämtliche zu bestimmende Kennwerte der Piezo-Aktoren an diesem Prüfstand im quasistatischen Bereich, also bei Belastung mit Gleich- bzw. Wechselspannung mit sehr kleinen Frequenzen durchgeführt werden. Die dynamische Messmethode wird in der vorliegenden Arbeit nicht weiter erläutert.

3.1 Aufbau des elektromechanischen Messplatzes

Das mechanische Herzstück des Aktor-Messplatzes stellt die Universal-Prüfmaschine MIDI der Firma MESSPHYSIK Fürstenfeld dar. Diese Sonderanfertigung mit extrem steifen Rahmen und Traverse ist auf einem Labortisch der Firma LINOS zum Schutze vor störenden Schwingungen oder Vibrationen und der Dämpfung derselbigen positioniert. Die direkte Ansteuerung der Prüfmaschine erfolgt durch eine Steuerbox DOLI EDC580 über einen Motorverstärker ME5-88 der Firma MESSPHYSIK. Diese Steuerbox wird wiederum von der MESSPHYSIK Software MCT („Metal Compression Test“), welche auf einem PC mit WINDOWS XP als Betriebssystem läuft, angesteuert. Alle gemessenen und an die Steuerbox EDC580 übermittelten elektrischen Messdaten werden inklusive den von der Motorsteuerung ME5-88 selbst erfassten Daten wie Hub („Stroke“), Zeit und somit Geschwindigkeit mit einer Abtastrate von 50 Hz an die Software MCT weitergeleitet und aufgezeichnet. Um den tatsächlich zurückgelegten Weg des Stempels präzise zu messen, sind an der Steuerbox DOLI EDC580 3 Wegaufnehmer angeschlossen, die

auf einem Stahlring mit 3 verstellbaren Füßen jeweils 120° in der Ebene versetzt montiert sind.

Das elektrische Pendant zur Universalprüfmaschine stellt die sogenannte Sawyer-Tower-Messschaltung dar. Diese stellt einen kapazitiven Spannungsteiler dar. Die Hauptkapazität ist der Piezo-Aktor, die Sekundärkapazität ist eine bekannte Vergleichskapazität, die als „Alpha-Ladungsbox“ bezeichnet wird. Diese Box besteht primär aus 14 parallel zueinander geschaltete Kondensatoren der italienischen Firma ITALFARAD. Es handelt sich hierbei um metallisierte Kunststoffolien-Kondensatoren (auch „Folkos“ genannt) mit einer nominalen Kapazität von 40 μF . Der große Vorteil dieser Kondensatorbauart liegt neben niedriger Temperaturabhängigkeit und hoher Impulsbelastbarkeit in der Selbstheilung bei einem möglichen Durchschlag, also einem punktuellen Kurzschluss. Der dabei entstehende Lichtbogen verdampft sowohl die metallische Elektrode als auch das Dielektrikum, also die Kunststoffolie. Durch den sich erhöhenden Dampfdruck werden die Elektroden durch Aufblähen voneinander gelöst bzw. verschoben. Zurück bleibt eine Gasblase, die wieder eine galvanische Trennung gewährleistet. Als negativer Effekt sinkt durch Zerstörung der metallischen Elektrode an der Durchschlagstelle die Elektrodenfläche. Die Kapazität des Kondensators sinkt dadurch nicht unbedingt signifikant, aber dennoch erkennbar. Bei Kondensatoren ohne Selbstheileffekt erfolgt bei Kurzschluss bzw. Durchschlag eine vollständige Zerstörung des Bauteiles. Als Nachteil dieser Kondensatorbauart kann die Größe angesehen werden. Im Vergleich zu Elektrolytkondensatoren (auch „Elkos“ genannt) benötigen sie rund das 10fache Volumen, um die gleiche Kapazität zu erzielen.

Des Weiteren können an der Alpha-Ladungsbox über mehrere durch Glasrohrsicherungen geschützte Eingangsbuchsen verschiedene Vorwiderstände, welche zur Strombegrenzung dienen, ausgewählt werden. Zu guter Letzt kann das Kondensator-Netzwerk über einen separaten Entladekreis mit Hilfe eines wiederum strombegrenzenden, ohmschen Widerstandes entladen werden.

Der Spannungsabfall an dieser Vergleichskapazität wird von einem Elektrometer 6514 der Firma KEITHLEY abgenommen und via Triaxialkabel an die Steuerbox DOLI EDC580 übermittelt. Die über die Sawyer-Tower-Schaltung an den Piezo-Aktor zusätzlich angelegte elektrische Spannung und die gewünschte Signalform wird von

einem Funktionsgenerator AFG3102 der Firma TEKTRONIX erstellt und an den Wechselspannungsverstärker HSA 4052 des Herstellers NF CORPORATION weitergeleitet. Des Weiteren wird durch einen integrierten Spannungsteiler im HSA 4052 die Gesamtspannung abgegriffen und an die Steuerbox DOLI EDC580 weitergeleitet. Abbildung 8 zeigt den elektromechanischen Messplatz des Instituts für Struktur- und Funktionskeramik/Montanuniversität Leoben.

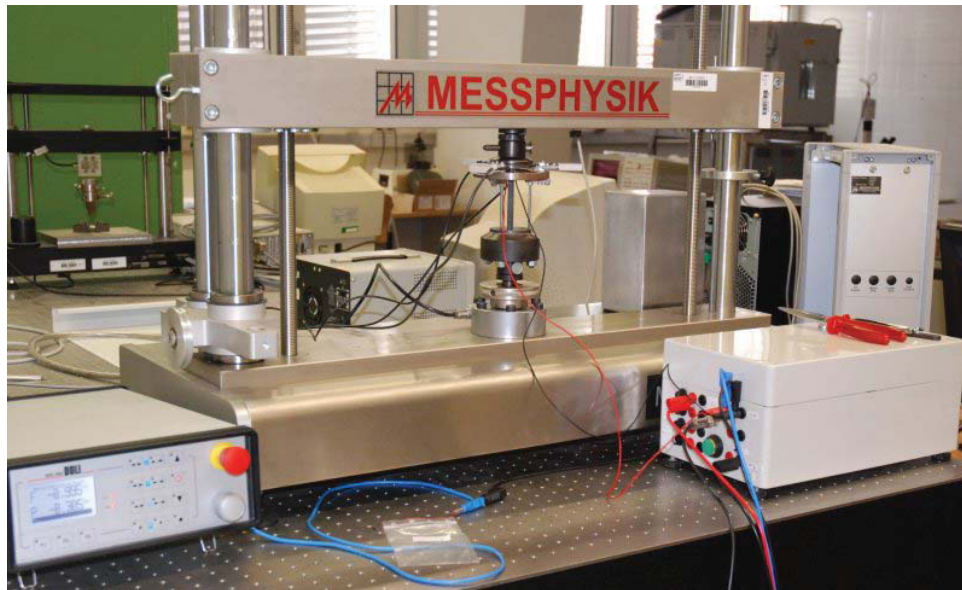


Abbildung 8: Piezo-Aktor-Messplatz der mechanischen Prüfung des Instituts für Struktur- und Funktionskeramik vor der Erweiterung. Ganz links unten ist die DOLI EDC580, mittig die Universalprüfmaschine MIDI und rechts unten die Alpha-Ladungsbox zu sehen.

3.1.1 Mechanische Komponenten

Aufgrund der sehr kleinen, maximalen Dehnung, welche bei Piezo-Aktoren im Betrieb auftritt, hat sowohl die Traverse als auch der Rahmen der Universalprüfmaschine eine äußerst hohe Steifigkeit aufzuweisen, um Messfehler aufgrund von Durchbiegung bzw. Stauchung zu minimieren. Die Prüfmaschine ist aus demselben Grund mit zwei Siliziumnitrid-Stempeln ausgestattet, wobei nur der obere Stempel durch eine Spindel bewegt werden kann. Da selbst die Verwendung der hinsichtlich der Steifigkeit optimierten Maschine die gewünschte Genauigkeit der

Aktorendehnung bzw. des Aktoren-Hubes durch den von der Prüfmaschine intern gemessene Traversenweg nicht erreicht wird, bedient man sich dreier induktiver Wegaufnehmer. Diese sind, um jeweils 120° in der Ebene versetzt, auf einem Gestell um die Probe herum angeordnet und bestimmen somit indirekt die Länge der Probe durch den Abstand beider Stempel, siehe Abbildung 9. Aus den drei Messsignalen der Wegaufnehmer wird während der Messung das arithmetische Mittel gebildet und mildert eine mögliche Verkipfung des Piezo-Aktors.

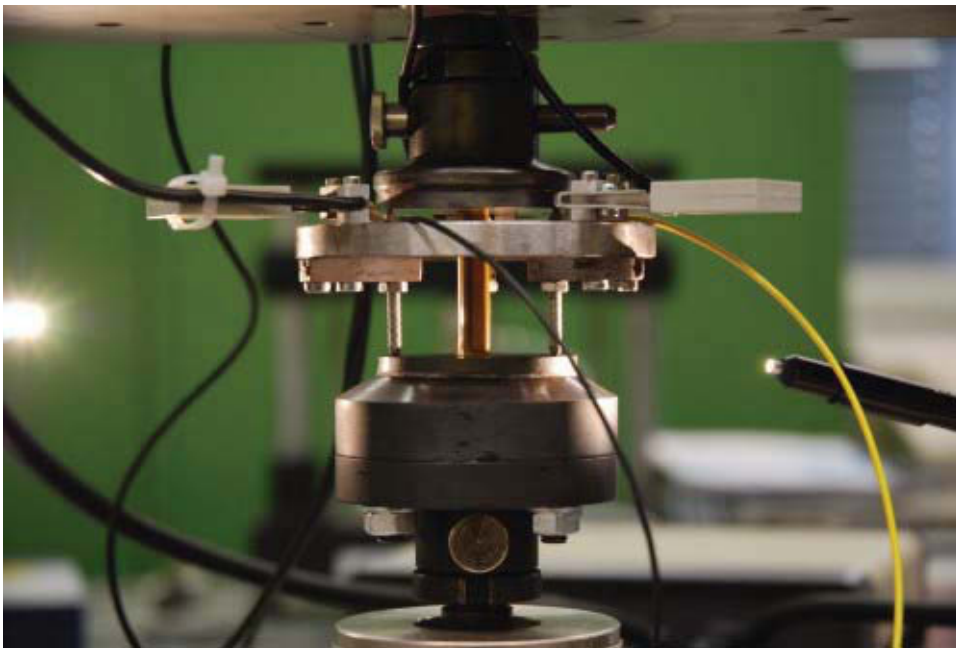


Abbildung 9: Ein zwischen die Siliziumnitrid-Stempel der MIDI-Prüfmaschine eingespannter Piezo-Aktor (orange), um diesen herum sind zwei der auf einem Gestell montierten, in der Ebene um 120° versetzten Wegaufnehmer zu sehen, der dritte an der Hinterseite ist verdeckt.

3.1.2 Elektrische Komponenten

Eine direkte Messung der Ladung bzw. der Kapazität ist aufgrund der Frequenzabhängigkeit nicht möglich. Aus diesem Grund muss auf eine indirekte Messmethode zurückgegriffen werden. Bei dieser Methode kommt die sogenannte „Sawyer-Tower-Schaltung“ zum Einsatz, siehe Abbildung 10. Es wird dabei eine bekannte Vergleichskapazität C_0 mit dem zu testenden Piezo-Aktor C_p in Serie

geschaltet. Es handelt sich also um eine Serienschaltung von zwei Kondensatoren. Die Spannungsabfälle an diesen Kondensatoren sind kapazitätsabhängig und verhalten sich nun wie folgt:

$$U_{AC} = U_P + U_0$$

Formel 3.1

U_{AC} ...Gesamtspannung [V]

U_P ...Spannungsabfall am Piezo-Aktor [V]

U_0 ...Spannungsabfall an der Vergleichskapazität [V]

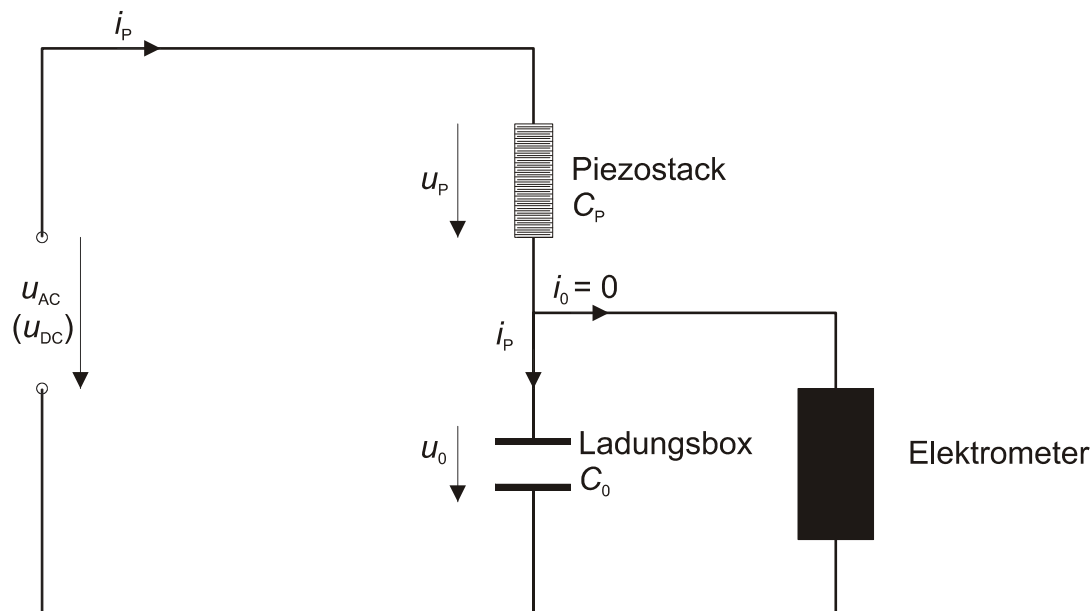


Abbildung 10: „Sawyer-Tower-Schaltung“ zur Bestimmung der Ladung
[gezeichnet von DI Hannes Grünbichler]

Die Gesamtspannung wird direkt mit Hilfe der Steuerbox DOLI EDC580 am Spannungsteiler des Wechselspannungsverstärker HSA 4052 abgegriffen. Nun wird durch ein Elektrometer 6514 der Firma KEITHLEY der Spannungsabfall U_0 an der Vergleichskapazität abgenommen. Durch den unbedingt notwendigen, extrem hohen Innenwiderstand von 200 TΩ des Elektrometers, kann der Leckstrom i_0 über dieses Messgerät vernachlässigt werden und eine hinreichende Präzision der Spannungsmessung, die sich im mV bis einstelligen V Bereich bewegt, gewährleistet werden. Ebenso hat an diesem Gerät eine Messbereichsauswahl (bis maximal 2 V,

20 V oder 200 V) vorgenommen zu werden, um die Präzision für die jeweils zu prüfende Bauteilserie zu erreichen. Der Strom i_p ist sowohl für Aktor als auch Vergleichskapazität gleich groß und somit auch der Ladungsfluss Q zwischen den beiden Kondensatoren. [Web, S21-22] Mittels der Formel

$$Q = C \cdot U$$

Formel 3.2

Q ...zugeführte Ladung [C]

C ...Kapazität des Kondensators [F]

U ...Spannung am Kondensator [V]

kann die Aktor-Kapazität C_p wie folgt errechnet werden: [Kuc, S429]

$$C_p = \frac{C_0 \cdot U_0}{U_p}$$

Formel 3.3

Durch die Verwendung des kapazitiven Spannungsteilers kann eine direkte, exakte Ansteuerung des Piezo-Aktors nicht erfolgen. Durch die prozentuelle Aufteilung der Spannungen kann zwar auf den effektiv wirksamen Spannungswert am Bauteil rückgerechnet werden, jedoch sind Experimente mit vorgegebener effektiver elektrischer Spannung nicht durchführbar. Dies ist ein großer Nachteil dieser Messmethode. Aufgrund dessen muss die Vergleichskapazität so dimensioniert sein, dass weniger als 1% der Gesamtspannung an der Vergleichspannung abfällt. Das bedeutet wiederum, dass die Vergleichskapazität eine sehr viel höhere Kapazität als der zu prüfende Piezo-Aktor besitzen muss (60fach ist ein aus der Praxis gewonnener und realistischer, unterer Grenzwert).

3.2 Ablauf einer Aktorenprüfung

3.2.1 Probenpräparation

Die für den Einsatz in Einspritzsystemen vollständig betriebsbereit in mit Silikon vergossenen Kunststoff-Topfhülsen gelieferten Piezo-Aktoren der Firma TDK-EPC, haben für die Prüfung an der Prüfmaschine bearbeitet zu werden. Die elektrischen Kontakte, welche an der Stirnseite der Aktoren ausgeleitet sind, müssen entfernt werden, da sie in Belastungsrichtung zeigen. Um aber elektrischen Kontakt zu den Elektroden zu gewährleisten, muss seitlich direkt unter den entfernten Kontakten die Kunststoff-Topfhülse und das darunter liegende Silikon mittels Skalpell und Feile sorgfältig und vorsichtig entfernt werden, um einer Beschädigung der „Harfe“ vorzubeugen. Nach der Freilegung der Kontakte sind diese von etwaigen Verunreinigungen (Kunststoff- bzw. Silikonreste) zu säubern. Danach wird ein Flußmittel zur Verbesserung der Löteigenschaften aufgetragen. Um eine Verwechslung zu vermeiden, werden die Aktoren durch Verwendung von Etikettaufklebern beschriftet. Die Verdrahtung des Stacks erfolgt über Litzendrähte des Querschnitts $0,5 \text{ mm}^2$. Das eine Ende wird sorgfältig an den Kontakt am Stack gelötet, das gegenüberliegende Ende mündet in einen Bananenstecker, der dem Anschluss an die Ladungsbox dient. Abschließend wird der nun fertig präparierte Piezostack noch mittels eines Multimeters auf korrekte Verlötung und Funktionstüchtigkeit überprüft. Die Probenpräparation ist bei Piezo-Aktoren unabhängig von Geometrie und Kapazität identisch.

Die Geometrie eines jeden Piezostacks wird vor jeder Beprobung vermessen und die wirksame Fläche berechnet. Bei der Auswertung wird durch das Bekanntsein der Fläche und der aufgebrauchten Kraft zu jedem Zeitpunkt der Messung auf die mechanische Spannung zurückgerechnet.

3.2.2 Vorbereitung des Prüfaufbaues

Im Vorfeld jeder Prüfreihe haben sowohl die Alpha-Ladungsbox als auch die drei induktiven Wegaufnehmer geprüft bzw. kalibriert zu werden, um eine Verfälschung der Messergebnisse auszuschließen.

Bei der Kalibrierung der Ladungsbox wird diese durch ein Sourcemeter 2400 der Firma Keithley konstant mit einem Ladungsfluss von $10 \mu\text{A}$ pro Sekunde aufgeladen und gleichzeitig die dadurch steigende Spannung mittels des Keithley-Elektrometers 6514 gemessen. Gesteuert wird dieser Versuch durch ein LabVIEW Programm, welches die Daten ebenfalls protokolliert. Im Anschluss kann mit Hilfe von Interpolation in einem speziell für diese Anwendung entwickeltes Auswerteprogramm die exakte Kapazität der Alpha-Ladungsbox bestimmt werden. Diese präzise Bestimmung vor jeder Prüfserie ist aufgrund der langsamen Abnahme der Kapazität über die Zeit erforderlich. Ebenfalls schmälern etwaige Durchschläge bei den Kunststofffolienkondensatoren die Kapazität.

Die Kalibrierung der drei induktiven Wegaufnehmer erfolgt durch das Durchlaufen eines MCT-Programms, das das Signal der Wegaufnehmer mit dem des Hubes des Traversenweges vergleicht. Dies geschieht im Leerlauf, also ohne jegliche Belastung, die eine Traversendurchbiegung hervorrufen könnte. Es darf pro Wegaufnehmer eine maximale Abweichung von 1 % auf 2 mm Wegstrecke zum Hub der Traverse auftreten, um eine vertretbare Genauigkeit aufzuweisen.

3.2.3 Prüfablauf

Wie schon im Vorfeld angesprochen, haben Piezo-Aktoren aufgrund der Abhängigkeit von elektrischer und mechanischer Belastung sowie der Temperatur bei mehreren Arbeitspunkten getestet zu werden.

Die mechanische Belastung wird mittels Druck-Lastrampen der MIDI Universalprüfmaschine aufgebracht, während zusätzlich die elektrische Belastung

durch Anlegen an die Sawyer-Tower-Schaltung (und somit indirekt an das zu prüfende Bauteil) erfolgt. Simultan dazu können diverse Einsatztemperaturen durch eine Temperierkammer simuliert werden. Die Temperierkammer erlaubt eine Generierung von zeitlich vorgegebenen Temperaturrampen. Da in dieser Arbeit jedoch ausschließlich Proben bei Raumtemperatur vermessen werden, wird auf eine detaillierte Erklärung des Prüfaufbaues für erhöhte Temperaturen verzichtet.

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass drei verschiedenartige Prüfabläufe zur Beprobung von Piezo-Aktoren herangezogen werden. Die erste Methode sieht vor, den Piezo-Aktor mit einer Gleichspannung konstant zu belasten und währenddessen mechanische Lastrampen auf das Bauteil aufzubringen. Zweitens ist es möglich, den Aktor unter einer bestimmten, vorgegebenen mechanischen Spannung mit elektrischen Spannungsrampen zu belasten. Die dritte und am seltensten angewandte Variante ist die vorgegebene, stetige Veränderung sowohl von elektrischer als auch mechanischer Belastung des Bauteils. Authentische Prüfabläufe finden sich unter Kapitel 5 „Versuche“.

3.3 Auswertung

Die durch das MCT-Programm protokollierten Messwerte sind Zeit, Kraft, Traversenhub, dreimal Weg der Wegaufnehmer, Spannungsabfall an der Alpha-Ladungsbox, Gesamtspannung an der Sawyer-Tower-Schaltung und optional die Temperatur. Diese Daten müssen zur weiteren Verwendung erst aufbereitet werden. Diese Aufbereitung wird vollautomatisch mit Hilfe eines AWK-Skriptes (AWK ist eine Programmiersprache die typischerweise für Datenauswertung verwendet wird) nach manueller Eingabe der Kapazität der Vergleichskapazität sowie des Messbereiches des Elektrometers 6514 durchgeführt. Die Aufgaben des Skriptes sind wie folgt:

- Die effektive elektrische Spannung am Stack U_{Stack} wird mit Formel 3.1 berechnet. Um die dadurch wirksame elektrische Feldstärke am Stack zu ermitteln, muss der Abstand der Elektroden im Piezostack bekannt sein. Dieser Abstand l ist

variabel, ist aber, wie unter Punkt „Allgemeiner Aufbau und Eigenschaften“ beschrieben, bei Aktoren der Serie A im Normalfall 80 μm . Die effektive elektrische Feldstärke E_{Stack} am Stack errechnet sich durch Verwendung von Formel 2.4.

- Der Maximalwert des elektrischen Feldes sollte 2 kVmm^{-1} (Polungsfeldstärke) nicht übersteigen, da dies elektrische Durchbrüche zur Folge haben könnte.
- Die vom Elektrometer 6514 an der Vergleichskapazität gemessene Spannung wird mit dem entsprechenden Faktor multipliziert, um den wahren Wert zu erhalten.
- Des Weiteren wird die Ladung mit Hilfe der Formel 3.2 bestimmt.
- Abschließend wird das arithmetische Mittel aus den drei Messwerten der induktiven Wegaufnahme eruiert.

3.4 Diagramme

Es werden im Folgenden die wichtigsten Diagramme zur optimalen, aussagekräftigen Darstellung von Piezo-Aktoren gezeigt und erläutert. Es handelt sich bei den dargebotenen Diagrammen zwar um Vorzeigebeispiele, jedoch sind sämtliche Schaubilder das Ergebnis von durchgeführten Prüfungen und somit authentisch.

Die Schmetterlingshysterese zeigt die Dehnung des Aktors, ausgehend vom unpolaren Zustand, bei sinusförmiger, bipolarer (sowohl positiver als auch negativer elektrischer Spannungsbereich) elektrischer Belastung, siehe Abbildung 11. Man beachte, dass die erste Periode bei einer Dehnung von Null (Jungfernkurve) startet, die beiden weiteren (im eingeschwungenen Zustand) jedoch immer aufgrund der Remanenz (verbleibende Polarisation) von diesem Wert abweichen. Ebenfalls kann

sowohl die Koerzitivfeldstärke abgeschätzt als auch das Erreichen der Sättigung (sämtliche Domänen ausgerichtet) beobachtet werden.

Eine Gegenüberstellung von Ladung und elektrischer Spannung wird im Kurvenblatt der Abbildung 12 dargestellt. Es handelt sich hierbei um die Polarisationshysterese, ebenfalls ausgehend vom unpolaren Zustand des Aktors. Der Aktor wird wiederum mit mehreren bipolaren, sinusförmigen Perioden belastet. Analog zur Schmetterlingshysterese liegt der Startwert der Kurve bei einer Ladung von 0 C.

In Abbildung 13 wird schließlich die Ladung in Abhängigkeit der elektrischen Spannung an einem gepolten Aktor im ausschließlich positiven elektrischen Spannungsbereich (unipolar) aufgezeigt. Es werden im Schaubild drei volle Belastungsperioden dargestellt. Auch hier kann die Remanenz ausgelesen werden.

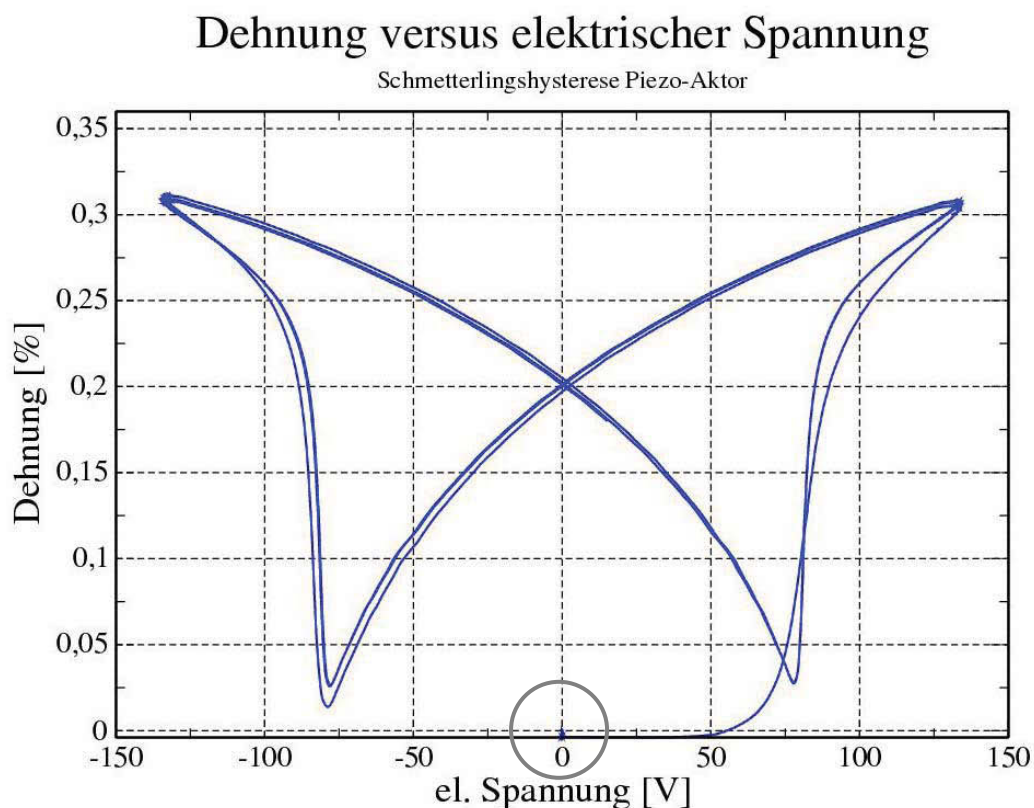


Abbildung 11: Schmetterlingshysterese, Dehnung über der Zeit, den Anfangspunkt der Kurve markiert der graue Kreis

Ladung versus elektrischer Spannung

Hystereseschleife Piezo-Aktor

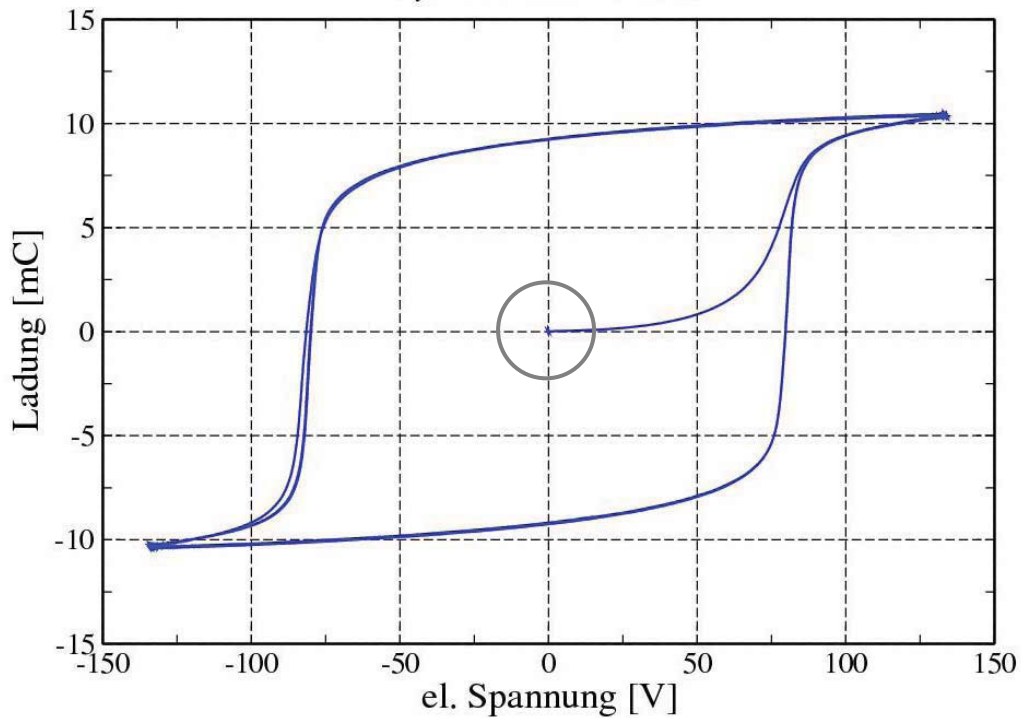


Abbildung 12: Hysterese bei bipolarer elektrischer Belastung, Ladung über elektrischer Spannung, den Anfangspunkt der Kurve markiert der graue Kreis

Ladung versus elektrischer Spannung

3 Perioden Dreieck-Spannung U : 0-200V, bei 0,1Hz und $F_v=2600N$, Serie A

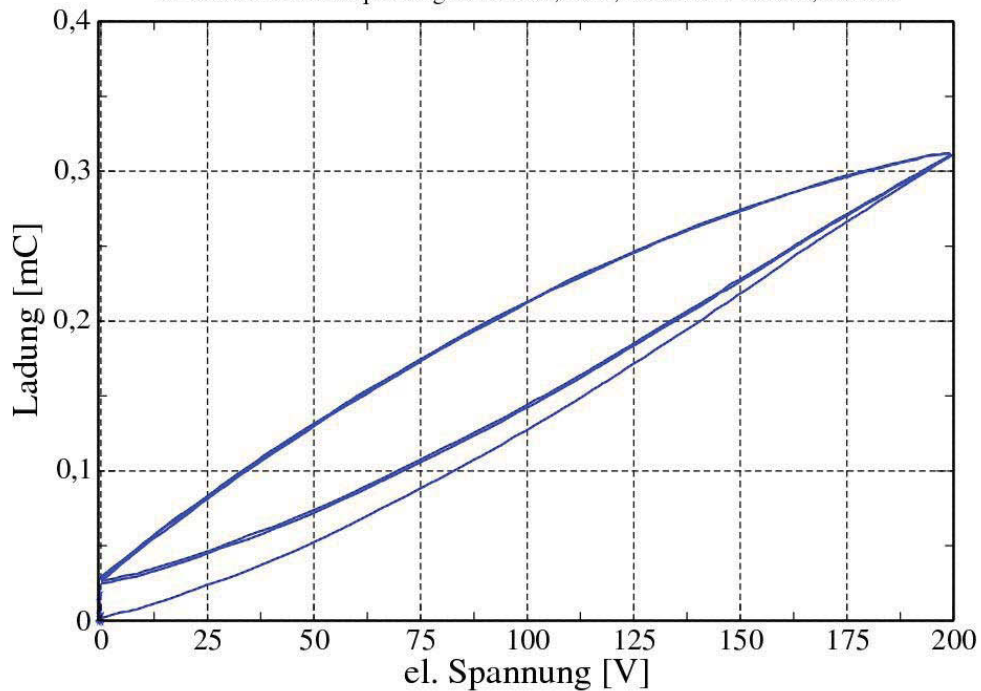


Abbildung 13: Unipolare elektrische Belastung, Ladung über elektrischer Spannung

3.5 Erweiterung des Aktoren-Messplatzes

Die in dieser Arbeit durchgeführte Erweiterung des elektromechanischen Messplatzes untergliedert sich in zwei Ausbaustufen.

3.5.1 Stufe 1: Kapazitätserhöhung der Vergleichskapazität

Da die Erweiterung des Aktor-Messplatzes zur Prüfung Piezo-Aktoren der Serie B eine Aufstockung der Vergleichskapazität (ohne Verwendung einer Spannungsausregelung am Bauteil) erfordert, wurde als erster Schritt dieser Diplomarbeit der Bau zusätzlicher Ladungsboxen festgelegt. Zur Steigerung dieser Vergleichskapazität wurden nun 6 weitere „Beta-Ladungsboxen“ (Abbildung 15) gefertigt, die allerdings nur parallel geschaltete Kondensatoren beherbergen und bei Bedarf baukastenartig an die Alpha-Ladungsbox (Abbildung14) angekoppelt werden können.

Beim Bau dieser 6 Beta-Ladungsboxen kamen abermals metallisierte Kunststoffolien-Kondensatoren der Firma ITALFARAD zum Einsatz, diesmal aber mit einer nominalen Kapazität von 50 μF . Diese Kondensatoren, insgesamt 110 an der Zahl, wurden durch Einsatz des R-C-Meters (AGILENT 4294A Precision Impedance Analyser) einzeln vermessen. Danach wurden in die Kunststoffboxen, welche zur Aufnahme der Kondensatoren und gleichzeitigem Schutz von Mensch und Material dienen, am Boden Löcher gebohrt, da die ITALFARAD-Kondensatoren einen Gewindesockel besitzen und mit diesem leicht und sicher befestigt werden können. Zu guter Letzt wurden die Bauteile in paralleler Schaltung verlötet und an jeweils eine Aus- und Eingangsbuchse geführt. Nach Fertigstellung dieser 6 Beta-Ladungsboxen wurde eine rechnerische Abschätzung der Parallelschaltung, also Aufsummierung der Einzelkapazitäten pro Beta-Ladungsbox, durchgeführt.

Eine präzise Kapazitätsmessung mittels LabVIEW Programm an einer singulären Beta-Ladungsbox ist aufgrund der fehlenden Schaltung nicht möglich, deshalb kann die Messung nur inklusive Alpha-Ladungsbox durchgeführt werden. Zur Ermittlung

der tatsächlichen Kapazität einer singulären Beta-Ladungsbox muss lediglich die Kapazität der separat vermessenen Alpha-Ladungsbox abgezogen werden. Die maximal erreichbare Kapazität des gesamten Verbundes beträgt ca. 5,6 mF.



Abbildung 14: Alpha-Ladungsbox



Abbildung 15: Beta-Ladungsbox

3.5.2 Stufe 2: Etablierung einer Spannungsregelung

Die zweite Ausbaustufe des Messplatzes hat die Aufgabe, eine weitere Steigerung der Messgenauigkeit nach sich zu ziehen und Experimente mit vorgegebenen elektrischen Spannungen am Bauteil durchführbar zu machen. Dazu soll die am Aktor anliegende Spannung möglichst genau auf den vorgegeben Wert, sowohl im Gleichspannungs- als auch Wechselfspannungsbereich, ausgeregelt werden. Es ist aber an dieser Stelle noch einmal darauf hinzuweisen, dass eine Spannungsausregelung direkt am Bauteil eine Erhöhung der Vergleichskapazität irrelevant macht. Um niedrigere Gesamtspannungen (im Vergleich zur Bauteil-Sollspannung) an der Sawyer-Tower-Schaltung zu realisieren und somit Ressourcen im Sinne von Equipment zu schonen, werden Aktoren mit höherer Kapazität mit größtmöglicher Vergleichskapazität gemessen.

Eine Automatisierung der Zu- bzw. Wegschaltung der Speisespannung exakt bei 0 V soll weiters eine homogenere Anfangsbelastung der Probe zu Beginn und Ende des Messvorganges zur Folge haben.

Abgesehen von qualitativen Verbesserungen hat auch die Benutzerfreundlichkeit gesteigert zu werden.

In Bezug auf die Auswahl der Programmiersprache wurde von vornherein die von National Instruments entwickelte Sprache LabVIEW festgelegt, da die entsprechende Soft- und Hardware am Institut ohne weiteren Aufwand bzw. Kosten zur Verfügung steht. Sämtliche Fakten bezüglich der Auslegung und Verwirklichung der Regelung werden unter Kapitel 4 LabVIEW behandelt.

4 LabVIEW

Die Programmiersprache LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) von National Instruments hat sich als Standard in den Bereichen Mess-, Steuer-, Regelungstechnik, Simulation sowie Datenerfassung, Datenanalyse und Datenvisualisierung etabliert. Die Einsatzbereiche sind vielfältig und erstrecken sich von der Forschung und Entwicklung über die Fertigung bis hin zur Lehre in den Fachgebieten Physik, Chemie, Medizin sowie den Ingenieurwissenschaften.

Der fundamentale Unterschied zu textbasierten Programmiersprachen wie z.B. C++ besteht darin, dass LabVIEW eine visuelle Programmiersprache ist. Der Quellcode wird somit mit Hilfe grafischer Elemente erzeugt. Hierbei muss allerdings klargestellt werden, dass der Begriff „grafische Programmierung“ in der Informatik im Normalfall die Darstellung bzw. Manipulation von grafischen Objekten auf einer Ausgabeeinheit (z.B. Monitor oder Drucker) bezeichnet. In den Ingenieurwissenschaften hat sich dieser Begriff jedoch für das Erstellen von Computerprogrammen mittels grafischer

Elemente eingebürgert. Um etwaige Missverständnisse von vornherein auszuschließen, sollte also der Begriff „visuelle Programmierung“ verwendet werden.

Da die Informatik immer mehr Einfluss in ingenieur- und naturwissenschaftlichen Bereichen gewinnt, werden zunehmend auch Techniker und Ingenieure mit komplexen Problemen mit ausgeprägtem Bezug auf Softwaretechnik konfrontiert. Die Ausbildung dieser Berufsgruppen beinhaltet jedoch meist nur eine spärliche Ausbildung in der softwaretechnischen Umsetzung ihrer Aufgaben. Produktzyklen und Entwicklungszeiten werden immer kürzer, und somit schrumpft im selben Maße die Zeit, die zur Erstellung qualitativer Software zur Verfügung steht. Um diesen Anforderungen Herr zu werden, muss auf diverse Methoden und Hilfsmittel in der Informatik zurückgegriffen werden. Eines davon ist die „visuelle Programmierung“, da Bilder in der rechten Hirnhälfte parallel und somit schneller bearbeitet werden als in der linken Hirnhälfte, die wiederum für textbasierte Information zuständig ist.

LabVIEW gilt zusätzlich als leicht zu erlernende Programmiersprache, was aber bei genauerer Betrachtung nicht der gesamten Wahrheit entspricht. Erfahrungsgemäß können mittels LabVIEW schon innerhalb weniger Stunden erste Resultate in Programmentwicklung und Gerätesteuerung erzielt werden. Allerdings ist bei Aufgabenstellungen mit zunehmender Komplexität sehr viel Erfahrung notwendig, genau wie beim Verwenden der Programmiersprache C++. [Müt, Vorwort]

Im Speziellen muss nun allerdings gesagt werden, dass die ausführliche Beschreibung des durch den Autor erstellten LabVIEW-Programms in dieser Diplomarbeit unmöglich ist. Da der Sourcecode der visuellen Programmierung logischerweise nur in Abbildungen zu Papier gebracht werden kann, wäre eine Flut von Veranschaulichungen diverser programmiertechnischer Instrumente und deren Routinen die Folge. Diese können jedoch am Papier nur sehr schwer zueinander in Verbindung gebracht und somit verstanden werden. Die entstandene Komplexität des Programms ist alleine durch die notwendige Zerlegung von programmiertechnischen Standardwerkzeugen, wie z.B. das Daten Ein- bzw. Auslesen in deren Bestandteile, enorm gestiegen.

Es wird daher auf die präzise, allumfassende Beschreibung des LabVIEW-Programms verzichtet. Selbstverständlich wird auf wichtige Programmroutinen (siehe Anhang A) sowie das Herzstück, dem Regelglied (siehe Anhang D), näher eingegangen sowie Zweck und Aufbau erläutert.

4.1 Anforderungen an das LabVIEW Programm

Die Aufgaben des LabVIEW Programms manifestieren sich in zwei Hauptaugenmerk.

Zum Einen soll die bisherige nur manuell bedienbare elektrische Signalgenerierung zur Speisung des zu testenden Aktors automatisiert werden. Das bedeutet, dass eine nicht arbiträre Signalform (wie z.B. ein Sinus-, Dreieck-, Rechteck- oder einfach nur Gleichspannungssignal) mit gewünschter Amplitude, Frequenz und Periodenanzahl erzeugt wird. Ein Vorteil bei der Automation ist der garantierte Start des Signals bei 0 V. Dies war beim manuellen Zuschalten beim Nulldurchgang nicht möglich. Es werden somit ungewollte Spannungssprünge zu Beginn und Ende der Messung vermieden. Bei einem gewollten Abbruch des Versuchs kann durch eine geeignete Bedingung im Quellcode stets ein langsames Absenken der Spannung (egal ob im positiven oder negativen Bereich) bis zum Nullpunkt vorgegeben werden. Eine Schädigung der Probe ist somit ausgeschlossen. Eine weitere Aufgabenstellung wäre die Implementierung einer nicht arbiträren Signalform, die allerdings erheblichen programmiertechnischen Aufwand mit sich bringt. Unter einem nicht arbiträren Signal versteht man eine willkürlich entworfene Signalform wie z.B. das Anfahren von Rampen mit alternierenden Spannungsplateaus mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Zeiten.

Zum Anderen kann durch die Erstellung einer Regelung eine sehr viel genauere elektrische Spannung an der Probe eingestellt werden. Hierbei wird von der gemessenen Gesamtspannung der Spannungsabfall an der Vergleichskapazität und somit die „wahre“ Spannung am Stack in genau diesem Augenblick eruiert. Ein Regelglied hat nun die Aufgabe, die Spannung am Piezostack auf die gewünschte, voreingestellte Spannung auszuregeln. Die Aufgabe mag bei Verwendung einer Gleichspannung einen fast lächerlichen Schwierigkeitsgrad besitzen. Allerdings bei

zeitlich veränderlichen Signalformen wie z.B. einer Sinusschwingung wird nun aber ebenfalls eine Ausregelung in Echtzeit gefordert. Es gilt allerdings zu beachten, dass auch der beste Regler immer eine gewisse Abweichung vom Sollwert, mag sie auch noch so gering sein, besitzt.

4.2 Erwartete Vorteile durch den Einsatz von LabVIEW:

- Der zu erwartende Fehler aufgrund der Spannungsabweichung an der im Test befindlichen Probe wurde bei der bisher verwendeten manuellen Methode in der Auswertung zwar mittels einer nachträglich durchgeführten Berechnung auf den realen Wert korrigiert, jedoch wurde der Stack somit trotzdem mit einer signifikanten Abweichung vom geforderten Sollwert getestet. Diese Spannungsabweichung soll auf ein Minimum reduziert werden und authentische Messungen gewährleisten.
- Durch das Testen von massiveren Stacks der Serie B würde nach bisheriger Methode durch deren zehnmal höhere Kapazität die Abweichung der elektrischen Spannung am Aktor nicht mehr tragbar sein. Dies könnte selbstverständlich durch den Ausbau der Vergleichskapazität wieder in die ursprüngliche „Genauigkeit“ zurückgeführt werden. Durch die Ausregelung mittels LabVIEW sollte jedoch die Größe der Vergleichskapazität keine Rolle mehr spielen, da der Sollwert für die Spannung am Stack und nicht die Gesamtspannung vorgegeben wird.
- Keine Unstetigkeiten der Signalform, die bei Abbrüchen des Prüfprogramms auftreten kann. Die elektrische Spannung soll durch entsprechende Mechanismen stets in einer vordefinierten Steigung der Spannung pro Zeiteinheit auf 0 V zurückgeführt werden. Dasselbe gilt natürlich bei der Auswahl einer Gleichspannung, deren Effektivwert wiederum langsam angefahren wird.
- Schneller durchführbare Performance-Tests. Bei Performance-Tests werden mechanische Spannungsplateaus, die durch die Prüfmaschine MIDI erzeugt werden, pyramidenartig angefahren und der Prüfling pro Plateau je nach Bedarf

mit mehreren Perioden elektrischer Spannung belastet. Es ist bei speziellen Prüfungen durchaus möglich bis zu 40 Plateaus anzufahren. Tests dieser Art können mehr als zwei Stunden dauern. Es wird eine deutliche Vereinfachung und Verkürzung bei Versuchen dieser Art erhofft.

- Fehler durch den Faktor „Mensch“ sind so weit wie möglich im programmiertechnischen Sinne zu verhindern.

4.3 Mögliche Nachteile durch den Einsatz von LabVIEW

- Es ist versucht worden, das Programm so zu gestalten, dass sämtliche notwendigen Eingaben vom Frontpanel aus durchgeführt werden können. Allerdings ist es nicht möglich, die Gesamtheit der zu variierenden Einstellungen vom Frontpanel aus einzugeben, da neben der Unübersichtlichkeit auch die Fehleranfälligkeit durch den User steigt. Somit ist es unumgänglich, bei einer gravierenden Änderung des Programms die Programmiersprache LabVIEW zumindest im Ansatz zu verstehen. Der Ausschluss menschlichen Versagens durch Verwendung des Programms kann nicht zu 100% gewährleistet werden, da in jedem Falle der Versuchsaufbau durch eine Person geschehen muss. Es ist allerdings durchaus vorstellbar, dass noch nicht dagewesene Fehlermöglichkeiten durch inkorrekte Abänderungen des Sourcecodes entstehen.
- Das Lesen eines nicht selbst geschriebenen LabVIEW Programms ist schwierig. Das Programm besitzt die Logik des Programmierers, aber nicht notwendigerweise die des Lesers. Es erfordert erheblichen Zeitaufwand, sich durch ein unbekanntes Programm zu arbeiten und die verschiedenen Strukturen und deren Funktionen zu erkennen.
- Es ist durchaus denkbar, bei der Umsetzung an Grenzen der Programmiersprache LabVIEW zu stoßen. LabVIEW findet zudem zum größten Teil in der Industrie Anwendung. Im universitären Bereich ist eine Verwendung nur vereinzelt zu verzeichnen. Das aus diversen Fachbüchern erlernte Wissen ist

jedoch lediglich die Spitze des Eisberges. Das Erstellen eines anspruchsvollen und umfangreichen Programms ist mit dieser kommerziellen Literatur nur sehr schwer möglich.

4.4 Auswahl des Reglers

Zu Beginn soll auf den Unterschied zwischen Steuerung und Regelung kurz eingegangen werden. Steuerungen arbeiten grundsätzlich mit dem sogenannten „offenen Wirkungsablauf“. Das Ergebnis einer Steuerung hat somit keinen Einfluss auf das Stellglied. Die Regelung hingegen ist ein Vorgang, bei dem die zu regelnde Größe (Regelgröße) fortlaufend erfasst, mit einer anderen Größe (Führungsgröße) verglichen und abhängig vom Ergebnis dieses Vergleichs im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. Der sich ergebende Wirkungsablauf findet in einem geschlossenen Kreis, dem Regelkreis, statt. Die zu regelnde Größe wird gemessen und der Messwert, zum Vergleich mit dem Sollwert, der Regeleinrichtung zurückgemeldet. [SRT]

Es ist somit ersichtlich, dass nur eine Regelung die Anforderungen der in dieser Arbeit geforderten Aufgabenstellung erfüllt.

Die Auswahl eines adäquaten Reglertyps, welcher sämtliche gestellte Anforderungen zu erfüllen hat, ohne nutzlose bzw. nicht Ziel führende, zusätzliche Regeleinrichtungen in die Regelung zu integrieren, ist von größter Wichtigkeit. Aufgrund dieser Tatsache wurde eine reguläre I-Regeleinrichtung, I steht für „Integral“, gewählt. Auf diese Integral-Regeleinrichtung soll im Folgenden näher eingegangen sowie Vor- und Nachteile aufgezeigt werden.

Die Besonderheit des Integralreglers ist, dass bei konstanter Regeldifferenz x_d am Eingang das Ausgangssignal, also die Stellgröße y , zeitlinear ansteigt. Die Stellgröße ändert sich demnach umso mehr, je länger die Regeldifferenz auftritt. Ein I-Regler liefert ein Ausgangssignal y , das der Dauer der Regeldifferenz x_d proportional ist. Bei einer Regeldifferenz von $x_d = 0$ besitzt das Stellglied eine

bestimmte Stellgröße y_0 . Die Stärke des Eingriffs und damit die Steilheit der Kennlinie wird durch den Beiwert K_I der I-Regleinrichtung gegeben.

$$y - y_0 = K_I \cdot t$$

Formel 4.1

Je größer K_I ist, desto stärker ändert sich die Stellgröße y in Abhängigkeit von der Zeit t . Soll ein Regeleingriff möglichst rasch erfolgen, so muss K_I groß gewählt werden. Aufgrund dessen sind bei den meisten Reglern die K_I -Werte in weiten Grenzen einstellbar.

Der herausragende Vorteil einer I-Regleinrichtung ist, dass eine Stellgröße y so lange bestehen bleibt, bis die Regeldifferenz tatsächlich Null ist. Somit kann beim Einsatz von I-Reglern, im Vergleich zu reinen Proportional- sowie Differenzial-Regleinrichtungen, eine vollständige Ausregelung ($x_d = 0$) erreicht werden.

Als Fazit kann somit gesagt werden, dass ohne Einsatz weiterer Regleinrichtungen der I-Regler zwar langsam, jedoch dafür aufgrund seiner theoretisch unendlichen Verstärkung sehr genau ist. [SRT]

Das Integralglied ist im elektronischen Sinne ein Operationsverstärker (Abbildung 16), welcher als invertierender Integrator ausgeführt ist. Die Nachstellzeit T_I (bzw. in diesem Fall Integrierzeitkonstante) errechnet sich aus dem ohmschen Widerstand R und der Kapazität des Kondensators C wie folgt:

$$T_I = R \cdot C$$

Formel 4.2

Der Integrierbeiwert K_I ergibt sich weiters aus:

$$K_I = \frac{1}{T_I}$$

Formel 4.3

Die Nachstellzeit bestimmt somit den Gradienten des Anstieges. [SRI]

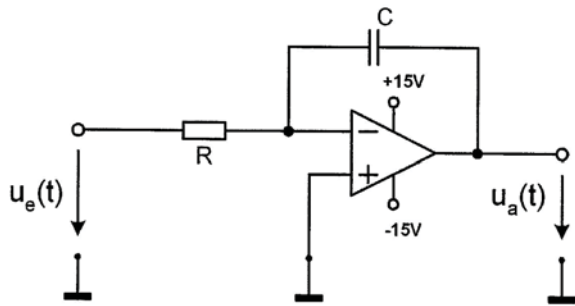


Abbildung 16: Invertierender Integrator

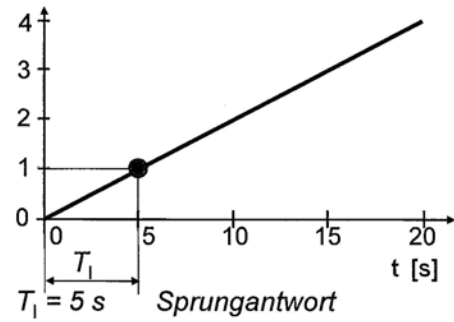


Abbildung 17: I-Sprungantwort bei $T_I = 5s$

Ein unerwünschter Effekt bei I-Regleinrichtungen ist der „Wind Up“-Effekt. Das Problem tritt bei einer Beschränkung der Stellgröße auf. Diese Beschränkung hat immer weiteres Integrieren zur Folge, obwohl die Stellgröße y aufgrund einer Stellgrößenbeschränkung schon den maximal möglichen Wert angenommen hat. Die Ausgangsgröße des Reglers wächst aber weiterhin und somit ergibt sich ein „Aufwickeln“ des Integrierers. Eine „Anti-Wind Up-Maßnahme“ ist somit eine Beschränkung der Ausgangsgröße, sobald die Stellgrößenbeschränkung in Aktion tritt. [Hor, S198]

4.5 Verwendete Hard- und Software

Sowohl für die Programmierung als auch die Versuchsdurchführung wurde die Software LabVIEW 2010, Version 10.0, in der 32-Bit Ausführung unter Windows XP bzw. Windows 7 (ohne jegliche Komplikation!) verwendet.

Die zusätzlich benötigte Hardware setzt sich aus einem Multifunktions-Datenerfassungsmodul NI PCI-6115 (Abbildung 18) mit einer Abtastrate von 10 Megasamples pro Sekunde und dem dazugehörigen Anschlussblock NI BNC-2110 (Abbildung 19) zusammen. Beide Geräte stammen aus dem Hause National Instruments.



Abbildung 18: Datenerfassungsmodul NI PCI-6115
 [http://sine.ni.com/nips/cds/pages/image?imagepath=/images/products/us/pci6115_1.jpg&title=NI%20PCI-6115&oracleLang=d, 19.09.2011]



Abbildung 19: Anschlussblock NI BNC-2110
 [http://sine.ni.com/nips/cds/pages/image?imagepath=/images/products/us/bnc-2110_1.jpg&title=NI%20BNC-2110&oracleLang=d, 19.09.2011]

Das Datenerfassungsmodul ist als PCI-Schnittstellenkarte ausgeführt und wird in einen PC integriert. Um Daten Ein- bzw. Auszulesen muss der Anschlussblock, welcher mehrere analoge und digitale Ein- und Ausgänge besitzt, mit dem Datenerfassungsmodul verbunden werden. Detaillierte Informationen bezüglich der Implementierung der LabVIEW-Hardware in den Versuchsaufbau finden sich im Anhang B.

4.6 SNAW

Das in dieser Arbeit entwickelte Programm wurde SNAW getauft. Diese Abkürzung steht für „Stabilized Non Arbitrary Waveform“, zu Deutsch „Stabilisierte Nicht Arbiträre Signalform“. Es werden in den folgenden Unterkapiteln die Hauptbestandteile des Programms besprochen. Es wird allerdings, wie schon im Vorfeld angesprochen, nur auf die wichtigsten Aspekte näher eingegangen.

Die Entwicklung des SNAW erfolgte in mehreren Stufen. Die verschiedenen Entwicklungsstadien wurden durch Versionsnummern gekennzeichnet. Die

Endversion und somit die Version mit der sämtliche Versuche dieser Arbeit durchgeführt wurden, trägt den Namen SNAW1.7.

Zu Beginn wurde eine State-Machine entworfen, die zu allererst im „Initialisierung“-State einen Initialisierungsvorgang startet und die Eingaben auf Richtigkeit überprüft. Sicherheitsmechanismen sorgen dafür, dass ein Programmstart nur bei Eingabe aller relevanten Daten innerhalb vorgegebener Parameter überhaupt möglich ist. Wird die Freigabe erteilt und das Programm gestartet, begibt es sich in den „Hold“-State. Dieser State ist im Grunde nur eine Warteschleife. Das System ist „scharf“ und wartet auf den Startschuss. In dieser Zeit können abermals sowohl die Eingaben durch den User als auch der Versuchsaufbau auf Korrektheit überprüft werden, und bei etwaigen Fehlern der Versuch durch Betätigen des Stopp-Schalters abgebrochen werden. Hier entscheidet sich, welcher State als nächstes in Aktion tritt. Wenn eine Gleichspannung ausgewählt, so wird in den „Rampe auf“-State gewechselt, welcher eine, vom User festlegbare, Spannungsrampe bis zum Endwert generiert. Diese Spannungsrampe wird allerdings nicht geregelt. Sie dient dem langsamen und bauteilschonenden Erreichen der gewünschten Betriebsspannung, bevor eine automatische Umschaltung in den „Run“-State erfolgt. Wird eine Wechselspannung mit dem Ausgangspunkt von 0 V gewählt, springt das Programm automatisch in den „Run“-State, in welchem das Herzstück des gesamten Programms, also die Regeleinrichtung, ihren Sitz hat. Das eingestellte elektrische Spannungssignal wird von Signalgeneratoren entworfen. Diese geben ein Signal mit gewünschter Phasenlage und Form (Sinus-, Dreieck-, Rechteck- oder Gleichspannung) mit einer Amplitude von 1 V aus. Pro Periode wird eine gewünschte Anzahl von Punkten, welche Einfluss auf Homogenität, Genauigkeit und Frequenz des Signals haben, generiert. Ein jeder dieser Punkte wird mittels Multiplikation der vom User gewünschten Sollspannung und der Division mit der am Wechselspannungsgenerator wählbaren Verstärkungsfaktors manipuliert und in den Regler hintereinander mittels Array eingespeist. Die wahre Frequenz der Ausgangsspannung ist somit nicht ident mit der des Signalgenerators, sondern ist abhängig von der Durchlaufzeit (bzw. Wartezeit) der Reglerschleife. Diese Durchlaufzeit, in welcher die Berechnung und Exekution der Reglerschleife durchgeführt werden, wird durch die gewünschte Frequenz errechnet. Dies bedeutet

jedoch, dass, sollte die Rechenzeit des Reglers die vorgegebene Durchlaufzeit übersteigen und diese somit vergrößern, eine unbrauchbare Ausgabe in Bezug auf Signalform bzw. Frequenz die Folge ist. Pro Schleifendurchgang werden jeweils Sollspannung und Istspannung, welche sich aus der Differenz zwischen der Gesamtspannung und dem Spannungsabfall an der Vergleichsspannung ergibt, verglichen. Die Ansteuerung des I-Reglers erfolgt über die mögliche Abweichung des Ist- vom Sollwertes, also der Regelabweichung x_d . Bei einer detektierten Regelabweichung wird der vom Signalgenerator erstellte temporäre Sollwert mit einer Variable, welche die Stellgröße y darstellt, multipliziert. Diese Variable v berechnet sich während des ersten Reglerausschlages aus:

$$v = K_I \cdot t + 1 \quad \text{Formel 4.4}$$

Der Integrierbeiwert K_I ist standardmäßig auf 0.001 gesetzt, kann allerdings vor Programmstart vom User festgelegt werden. Die Integrierzeit t ist in unserem Fall nichts anderes als die Schleifendurchlaufzahl. Beim Ausregeln und somit Umschlagen von gewünschter Erhöhung zu Erniedrigung oder umgekehrt, muss die Formel jedoch abgeändert werden in:

$$v_i = v_{i-1} \pm K_I \quad \text{Formel 4.5}$$

Nachdem die gewünschte Anzahl der elektrischen Spannungsperioden bzw. die entsprechende Anzahl von generierten Punkten abgefahren wurde, begibt sich das Programm entweder in den „Rampe ab“-State oder den „Stop“-State. Der „Rampe ab“-State, welcher selbstverständlich das Gegenstück zum „Rampe auf“-State darstellt und somit nur bei Gleichspannungen bzw. Wechselspannungen mit Offsetspannung $\neq 0$ in Aktion tritt, garantiert eine langsame Absenkung der Spannung auf 0 V. Der „Stop“-State beendet das Programm vollständig.

Durch weitere Verbesserung wurde diese State-Machine noch in eine gestapelte Sequenzstruktur gebettet, die vor und nach dem Programmdurchlauf sämtliche Schalter am Frontpanel und Variablen zurücksetzt sowie die Historie löscht.

Im Laufe der weiteren Entwicklung des LabVIEW-Programms wurden Datenerfassungs- und Ausgabeeinheiten (DAQs), welche anfangs durch gebrauchsfertige programmtechnische Standardbausteine (Sub-Vis) von LabVIEW verwirklicht wurden, durch mühsame Aufspaltung in deren Einzelkomponenten zerlegt, um deren Funktionen zu optimieren. Diese Maßnahme wurde nach ersten Tests ergriffen, da in der Realität eine gravierende Abweichung der Durchlaufzeit der Reglerschleife im Gegensatz zu der in der Entwicklungsumgebung (LabVIEW-Simulationsmodus) verzeichneten Zeitspanne in Erscheinung getreten ist. Durch hohen programmiertechnischen Aufwand und der damit einhergehenden Expansion des Sourcecodes konnte eine Erhöhung der maximalen Frequenz von 0,15 Hz auf 0,33 Hz (bei 1000 berechneten Punkten pro Periode) bzw. 3,33 Hz (bei 100 berechneten Werten pro Periode) erzielt werden.

Im Laufe der Arbeit wurde ein weiterer State zwischen „Hold“- und „Rampe auf“- bzw. „Run“-State eingefügt. Dieser „Pressing“-State hat die Aufgabe, zu Beginn der Messung die Vergleichskapazität durch Anlegen einer entgegen gesetzten elektrischen Speisespannung an der Sawyer-Tower-Schaltung auf 0 V zu halten. Somit wird bei mechanischer Belastung des Piezo-Aktors bis zur gewünschten Vorspannung dem entstehenden Ladungsfluss vom Aktor zur Vergleichskapazität entgegengewirkt. Beim Start der Regelung liegen somit konstante Startwerte vor, die ohne Verwendung dieser Funktion weder vorhersagbar noch beeinflussbar sind. Es können somit Prüfungen mit höherer Komplexität aufgrund der Steigerung der bekannten Randwerte exakter durchgeführt werden.

Die Bedienungsanleitung des SNAW1.7 wird in Anhang C bereitgestellt.

5 Versuche

5.1 Verifikation der LabVIEW Erweiterung

Um die erfolgreiche Verbesserung des Messplatzes durch die 2 Ausbaustufen zu verifizieren, wird die bis dato verwendete Messmethode mit den neu entworfenen Methoden direkt verglichen. Sämtliche Tests wurden an derselben Probe durchgeführt. Diese wurde während des gesamten Versuchsprogramms weder aus der Prüfmaschine ausgespannt noch anderwärtig verändert. Die Tests wurden ferner hintereinander in einem Zug ausgeführt, um eine Beeinflussung durch sich verändernde Umweltgegebenheiten (Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit) so gering wie möglich zu halten.

5.1.1 Messaufbau und Messmethoden

Die Versuchbedingungen sind, wie schon in der Einleitung erwähnt, mit Ausnahme der Spannungsgenerierung vollkommen identisch. Die Probe wurde pro Test mit drei identischen Spannungsrampen im positiven Bereich (zwischen 0 und einem Maximalwert) mit einer Dreiecks-Signalform mit einer Frequenz von 0,1 Hz bei einer mechanischen Vorspannung von 2600 N belastet. Jede Probe wurde wiederum pro Messmethode in drei direkt aufeinanderfolgenden Tests mit den elektrischen Maximalspannungen von 40, 120 und 200 V beaufschlagt. Dieser Prüfmodus ist, wenn auch in leicht vereinfachter Form durch die Beschränkung auf lediglich drei Maximalspannungsniveaus, eine angewandte Methode zur Bestimmung der Güte des Aktors.

Die 4 verwendeten Messmethoden sind wie folgt:

- a) Die Spannungsgenerierung erfolgt durch den Funktionsgenerator AFG3102 der Firma TEKTRONIX. Die Vergleichskapazität setzt sich aus der Alpha- sowie allen 6 Beta-Ladungsboxen zusammen und beträgt somit ungefähr 5,6 mF.
- b) Die Spannungsgenerierung erfolgt durch den Funktionsgenerator AFG3102 der Firma TEKTRONIX. Die Vergleichskapazität setzt sich ausschließlich aus der Alpha-Ladungsbox zusammen und beträgt somit ungefähr 570 μ F.
- c) Die Spannungsgenerierung erfolgt durch das LabVIEW-Programm SNAW1.7. Die Vergleichskapazität setzt sich ausschließlich aus der Alpha-Ladungsbox zusammen und beträgt somit ungefähr 570 μ F.
- d) Die Spannungsgenerierung erfolgt durch das LabVIEW-Programm SNAW1.7. Die Vergleichskapazität setzt sich aus der Alpha- sowie allen 6 Beta-Ladungsboxen zusammen und beträgt somit ungefähr 5,6 mF.

5.1.2 Auswertung

Zu allererst soll die effektiv wirksame Spannung am Stack gegenübergestellt werden. Im folgenden Diagramm (Abbildung 20) wird die Spannung U_{Stack} über der Zeit aufgetragen. Die 4 unterschiedlichen Methoden wurden horizontal gegeneinander verschoben, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen.

Durch das Abgreifen der Speisespannung des Wechselspannungsgenerators durch den Monitoreingang werden im Diagramm die Methoden a und b kontinuierlich aufgenommen, obwohl das manuelle Zuschalten der Spannung noch nicht erfolgt ist. Es werden somit „Geisterkurven“ erzeugt. Bei Methoden c und d wird ausschließlich das authentische Spannungssignal aufgenommen, da der Wechselspannungsgenerator via LabVIEW gesteuert wird, siehe Abbildung 20.

Es ist deutlich erkennbar, dass der verwendete Funktionsgenerator eine Unstetigkeit in der Signalgenerierung im untersten Spannungsbereich (bei ungefähr 7 V) erzeugt. Diese Unstetigkeit wird in Abbildung 20 sowie 23 aufgezeigt. Bei Generierung durch SNAW1.7 kann keine Unstetigkeit festgestellt werden.

Die Methoden a und b erzeugen eine zu hohe Speisespannung und somit eine Ungenauigkeit. Bei Methode a ist aufgrund der höheren Vergleichskapazität der Spannungsabfall an eben dieser geringer als bei Methode b. Die über LabVIEW geregelten Methoden c und d garantieren eine exakte Spannung U_{Stack} , welche nur um die nicht vermeidbare Regelabweichung von $\pm 0,3$ V, welche bei Gleichspannung beobachtet wird, eintreten kann, siehe Abbildung 20 bzw. 21.

Es wird darauf verzichtet, sämtliche Gegenüberstellungen in Diagrammform zu präsentieren. Die Ergebnisse der tatsächlichen Spannung am Aktor U_{Stack} und deren Abweichung zum geforderten Sollwert U_{Soll} sind in Tabelle 1 abzulesen.

Sowohl eine gravierende Abweichung von der gewünschten Frequenz als auch eine unerwünschte Welligkeit wurden bei den mittels Funktionsgenerator erstellten Signalen entdeckt, siehe Abbildung 22 und 23.

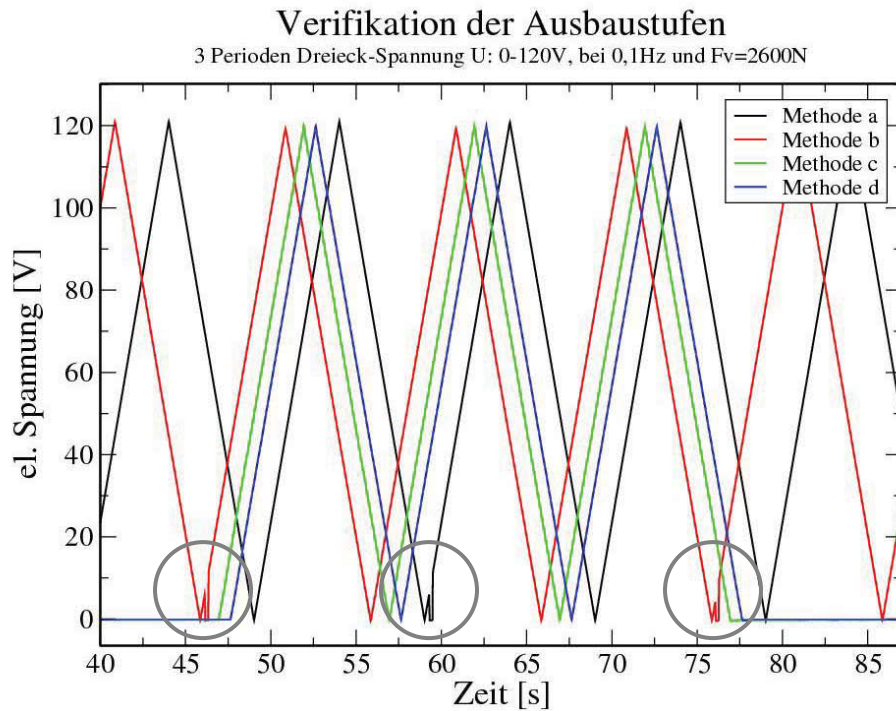


Abbildung 20: Gegenüberstellung der 4 Methoden. Die via Funktionsgenerator erzeugten Signale (Kurven schwarz und rot) zeigen eine Unstetigkeit im untersten Spannungsbereich (graue Kreise). Die LabVIEW generierten Signale (Kurven grün und blau) weisen keine Unstetigkeit auf.

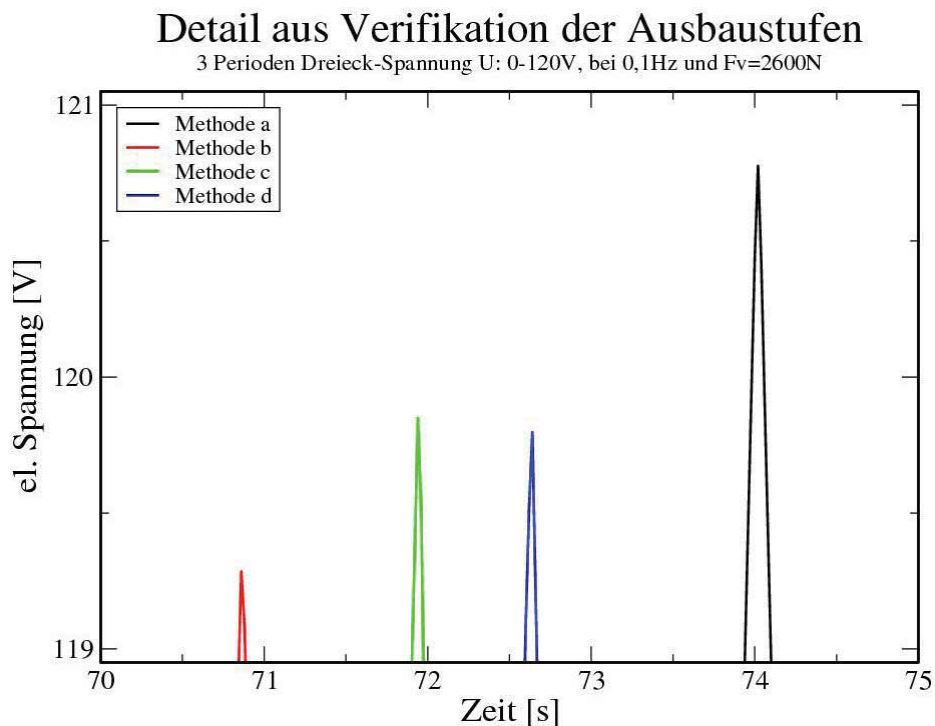


Abbildung 21: Detail aus Abbildung 19, welches die unterschiedlichen Maximalwerte hervorhebt. Die LabVIEW gestützten Methoden (Kurven blau und grün) kommen dem gewünschten Sollwert von 120 V am nächsten. Die durch den Funktionsgenerator erzeugten elektrischen Spannungen (Kurven rot und schwarz) weisen hingegen eine größere Abweichung von diesem Sollwert auf.

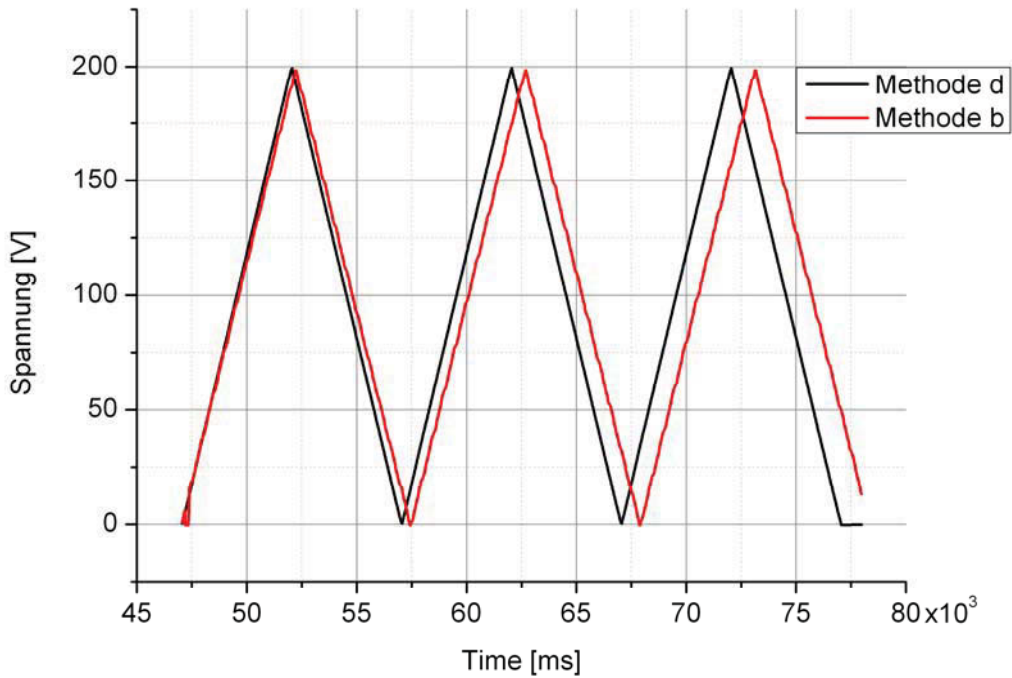


Abbildung 22: Direkte Gegenüberstellung der Generierung mittels Frequenzgenerator (Methode b) und SNAW1.7 (Methode d). Die schwarze Kurve wird exakt mit der gewählten Frequenz dargestellt und besitzt keine merkbare Welligkeit. Die rote Kurve hingegen weicht erheblich von der Vorgabe in Bezug auf die Frequenz ab und besitzt zudem eine deutlich erkennbare Welligkeit.

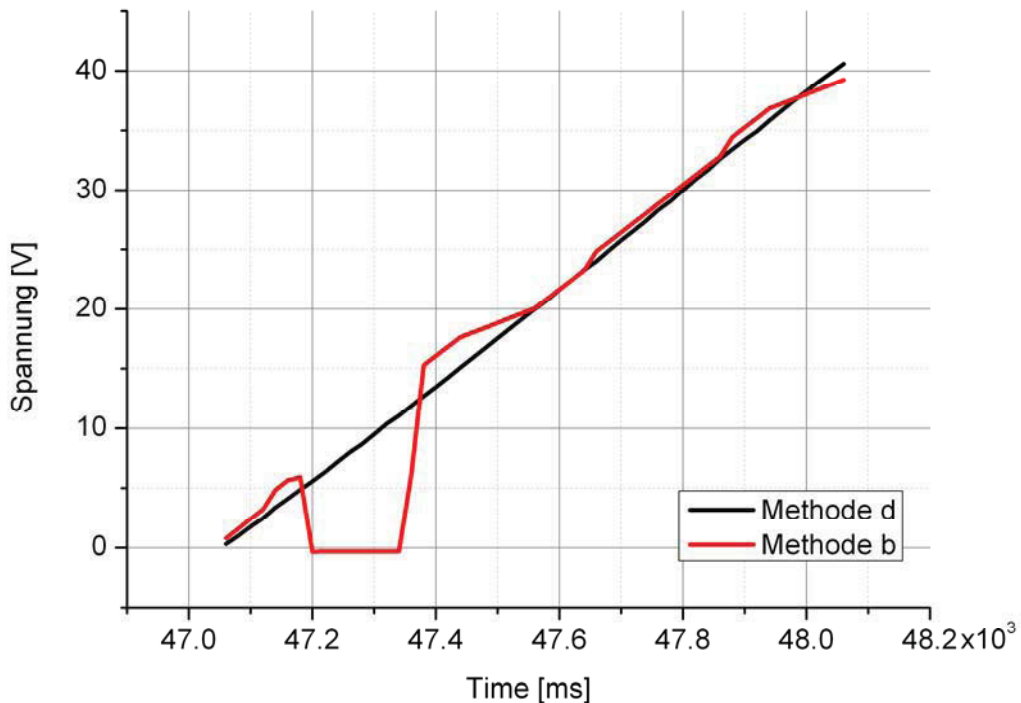


Abbildung 23: Detail aus Abbildung 21, welches deutlich die Unstetigkeit und Inhomogenität der roten Kurve (Methode b) und den Verlauf der schwarzen Kurve (Methode d) zeigt. Die Schwarze Kurve deckt sich mit der Vorgabe.

Tabelle 1: Gegenüberstellung von U_{Stack} und U_{Soll} sowie der resultierenden Abweichung

U_{Soll}	U_{Stack} [V] der Methode				Abweichung [%] der Methode			
	a	b	c	d	a	b	c	d
40 V	40,060	39,715	39,687	39,726	0,151	0,714	0,782	0,684
120 V	120,789	119,286	119,916	119,798	0,657	0,595	0,070	0,168
200 V	201,426	198,502	199,371	199,470	0,713	0,750	0,315	0,266

Aufgrund der Ungenauigkeit des Spannungssignals des Funktionsgenerators werden bei den Methoden a und b grundsätzlich zu hohe Speisespannungen der Sawyer-Tower-Schaltung erstellt. Dies führt bei sämtlichen in diesem Versuch getesteten Sollspannungen am Piezostack zu einer zufälligen, noch nicht bekannten und somit ungewollten Abmilderung des Fehlers. Bei der Versuchsreihe mit $U_{Soll} = 40$ V tritt aufgrund dieser Tatsache die niedrigste Abweichung bei Methode a auf. Bei höheren Sollspannungen (120/200 V) wird dieser Effekt eindeutig abgeschwächt. Der prozentuelle Fehler steigt deutlich gegenüber den Messmethoden c und d.

Weiters soll gezeigt werden, wie exakt der Minimalwert von 0 V erreicht wird. Ein Abgleiten der Spannung am Stack in den negativen Bereich ist in diesem Fall nicht wünschenswert und somit zu vermeiden.

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Abweichung vom Minimalwert 0 V

U_{Soll}	Minimalwert U_{Stack} [V] der Methode			
	a	b	c	d
40 V	-0,308	-0,336	-0,127	-0,139
120 V	-0,282	-0,375	-0,164	-0,07
200 V	-0,212	-0,292	0,331	0,228

Auch hier muss ebenfalls festgestellt werden, dass die Abweichung des Reglers im schlechtmöglichsten Fall 0,3 V betragen kann. In diesen Versuchen können sich die LabVIEW geregelten Methoden c und d in der Genauigkeit durchsetzen. Bei 200 V

Maximalspannung ist ein Verbleiben der Spannungskurve im positiven Bereich zu verzeichnen, allerdings mit einer beträchtlichen Toleranz.

5.1.3 Diskussion der Ergebnisse

- Der prozentuale Fehler der bisher angewendeten Messmethoden a und b steigt mit der Sollspannung. Somit ist bei genauerer Betrachtung der Einsatz des SNAW1.7 umso effektiver, je höher diese Spannung gewählt wird.
- Bei Wechselspannung tritt eine Abweichung des Istwertes vom Sollwert auf. Diese ist allerdings größer als das nominale Pendeln von 0,3 V, welches bei Gleichspannung beobachtet wird. Die größte Abweichung, festgestellt während der Versuche, schlägt sich mit 0,63 V zu Buche (Tabelle 1, Methode c, 200 V). Diese Abweichung ist erheblich, jedoch im Vergleich mit der bisherigen Messmethode wird in diesem „schlechtesten“ Fall dennoch mehr als eine Halbierung der Ungenauigkeit erreicht (Tabelle 1, Methoden a und b, 200 V).
- Die bisher noch unbekannte Ungenauigkeit des Funktionsgenerators schwächt im direkten Vergleich die prozentuale Verbesserung durch den Einsatz des SNAW1.7. Jedoch muss hier ebenfalls festgehalten werden, dass die bisher getätigten Versuche mit Messmethode b somit eine höhere Präzision als gedacht besitzen.
- Ein unerwünschtes Unterschreiten des Minimalwertes von 0 V wird durch SNAW1.7 deutlich abgemildert, jedoch aufgrund des Reglerpendelns nicht völlig verhindert (Tabelle 2).
- Die Unstetigkeit in der Signalgenerierung des Funktionsgenerators ist ein weiterer Malus, der durch den Einsatz des SNAW1.7 vollkommen kaschiert wird (Abbildungen 20 und 23).

- Die Ungenauigkeit der vom Funktionsgenerator erzeugten Spannung in Bezug auf die Frequenz macht eine direkte Gegenüberstellung mittels Differenz-Diagrammen nicht sinnvoll bzw. unmöglich. Die Abweichung der bisherigen Methoden beträgt bis zu 5% vom gewünschten Frequenzwert. Das SNAW1.7 folgt exakt der Vorgabe (Abbildung 22).
- Die vom Funktionsgenerator erzeugte Spannung ist stark wellig und inhomogen. Das SNAW1.7 erzeugt homogene, gerade Spannungsrampen, abgesehen von der Welligkeit des Regelvorganges (Abbildungen 22 und 23).
- Das SNAW1.7 arbeitet stabil, es musste jedoch bei einem Testversuch der Absturz des Betriebssystems beobachtet werden. Die programmiertechnischen Schutz- und Steuermechanismen des SNAW1.7 sind bei einem Zwischenfall dieser Art nutzlos. Bei einem Neustart des Betriebssystems wird der Ausgang der LabVIEW-Karte genullt, und somit fällt die Spannung am Aktor abrupt ab. Um dieser schockartigen Entlastung und der nicht auszuschließenden Beschädigung des Piezo-Stacks entgegenzuwirken, muss der Wechsellspannungsgenerator manuell durch Verwendung des DC-Offset langsam auf 0 V heruntergefahren werden.

5.2 Vermessung eines Piezo-Aktors mit hoher Kapazität

Mit Hilfe des neuen Messsystems soll ein, mit Methode b schon bereits geprüfter, Piezo-Aktor der Serie B abermals getestet und die Ergebnisse gegenübergestellt werden. Aufgrund der hohen Kapazität des Stacks wird hierbei selbstverständlich Methode d zum Einsatz gebracht, um eine größtmögliche Genauigkeit und somit eine größtmögliche Differenz im Vergleich zur herkömmlichen Messung zu erzielen.

5.2.1 Messaufbau

Der Piezo-Aktor der Serie B wird exakt demselben Prüfablauf bei dieser erneuten Überprüfung unterzogen. Die herkömmliche Versuchsreihe wurde jedoch ohne erhöhte Vergleichskapazität durchgeführt. Aus diesem Grund wurde durch den hohen Spannungsabfall an der Alpha-Box die Gesamtspannung U_{AC} (Wechselspannung) bzw. U_{DC} (Gleichspannung) prozentuell an diesen Verlust angepasst und somit angehoben, um die gewollte Spannung am Stack zu erreichen.

Der Prüfablauf gestaltet sich wie folgt:

Der Piezo-Aktor wird bei einer konstant gehaltenen Kraft von 2600 N hintereinander mit 3 elektrischen Dreieck-Lastrampen bei einer Frequenz von 0,1 Hz im positiven Bereich zwischen 0 und 40, 80, 120, 160 sowie 200 V (entspricht 0, 42, 84, 126, 168 und 210 V bei der herkömmlichen Methode b) belastet.

Das bei der Verifikation zum Vorschein getretene Problem der Frequenzabweichung macht allerdings ebenso in diesem Versuch den Gebrauch von Differenz-Diagrammen unmöglich.

Aus diesem Grund werden wiederum lediglich die Maximal- und Minimalwerte der Messmethoden b und d gegenübergestellt. Es muss aber an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen werden, dass es sich bei der Messmethode b um eine Prototyp-Messung handelt. Die Einstellung des gewünschten Sollwertes am Piezo-Aktor erfolgte durch prozentuale Anpassung des Maximalwertes der angelegten Gesamtspannung U_{AC} . Durch Verwendung dieser Richtwerte ist mit einem erheblichen Verlust der Genauigkeit, welcher durch den Einsatz der niedrigen Vergleichskapazität noch verstärkt wird, zu rechnen.

5.2.2 Auswertung

Aufgrund der starken Abweichung der Frequenz der beiden Messmethoden werden lediglich die Maximal- und Minimalwerte gegenübergestellt.

Tabelle 3: Direkte Gegenüberstellung von Messmethoden b und d an einem Piezo-Aktor der Serie B

U_{Soll} [V]	U_{AC} [V]	U_{Stack} [V] der Methode		Abweichung [%] der Methode		Abweichung [V] von 0 V der Methode	
		b	d	b	d	b	d
40	42	38,778	39,784	3,055	0,540	-0,927	0,028
80	84	74,009	79,899	7,489	0,126	-3,440	-0,160
120	126	112,479	120,034	6,267	0,028	-3,749	-0,268
160	168	153,748	159,960	3,907	0,025	-3,186	-0,058
200	210	195,539	199,992	2,230	0,004	-2,858	-0,064

Die Abweichungen vom gewünschten Sollwert am Stack der Methode b ist trotz prozentualer Erhöhung der Gesamtspannung U_{AC} erheblich. Die maximal vertretbare Ungenauigkeit von 1% kann in keinem der Versuche eingehalten werden. Die von SNAW1.7 generierte Spannung am Stack weicht im schlechtesten Fall um 0,54% ab (Tabelle 3, Methode d, 40 V). Diese Abweichung ist auf die niedrig gewählte Sollspannung zurückzuführen, bei der die erzeugte Welligkeit durch den I-Regler stark ins Gewicht fällt. Wird diese Sollspannung jedoch gesteigert, so nehmen die prozentualen Abweichungen ab und erreichen bei 200 V verschwindend geringe 0,004% (Tabelle 3, Methode d, 200 V).

Eine signifikante Unterschreitung des Minimalwertes von 0 V, welche mit einer negativen elektrischen Belastung des Aktors verbunden ist, kann ausschließlich bei Methode b beobachtet werden. Das SNAW1.7 gestattet in den Versuchen eine maximale negative elektrische Spannung von -0,268 V (Tabelle 3, Methode d, 120 V). Dieser Wert stellt im Vergleich zu den mit Methode b gemessenen -3,749 V eine deutliche Verbesserung dar. Die grobe Abweichung kann möglicherweise ebenfalls durch fehlende Präzision des Funktionsgenerators erklärt werden. Es wäre

jedoch denkbar, dass nicht nur der Funktionsgenerator selbst sondern die Kombination des genannten mit dem Wechselspannungsverstärker zu addierten Ungenauigkeiten führt.

5.2.3 Diskussion der Ergebnisse

- Die schon unter Punkt 5.1 „Verifikation der LabVIEW Erweiterung“ aufgezählten Unzulänglichkeiten des Frequenzgenerators verhindern auch bei der Vermessung höherkapazitiver Piezo-Aktoren eine direkte Gegenüberstellung der beiden Messmethoden mittels Differenz-Diagrammen. Die Auswertung der Ergebnisse von Methode b zeigen wiederum eine wellige, inhomogene Spannung, die von der gewünschten Frequenz deutlich abweicht.
- Der prozentuale Fehler der durch SNAW1.7 generierten Sollspannung sinkt mit steigender Amplitude. Das SNAW1.7 ist umso effektiver, je höher diese Spannung gewählt wird.
- Das SNAW1.7 erzielt bei Piezo-Aktoren mit Kapazitäten in der Höhe von 100 μF eine ausreichende Genauigkeit von unter 1% Abweichung.
- Das unerwünschte Unterschreiten des Minimalwertes von 0 V wird durch SNAW1.7 im direkten Vergleich der Methoden deutlich abgemildert, jedoch nicht völlig verhindert.

6 Zusammenfassende Betrachtung

In dieser Arbeit wurde die Sawyer-Tower-Messschaltung eines elektromechanischen Messplatzes erweitert und modifiziert. Es konnte eine Spannungsausregelung am zu

prüfenden Bauteil mit Hilfe eines LabVIEW Programms mit Namen SNAW1.7 etabliert werden. Sekundär wurde in dieser Arbeit die Steigerung der Vergleichskapazität durch den Bau zusätzlicher Ladungsboxen erreicht.

Das SNAW1.7 erfüllt die primär an das Programm gestellte Anforderung des Aufbringens sowie Ausregelns einer definierten elektrischen Spannung am zu prüfenden Piezo-Aktor.

Das SNAW1.7 erzielt bei der Vermessung von Piezo-Aktoren eine empirische Genauigkeit von $\pm 0,3$ V bei Verwendung von Gleichspannung und $\pm 0,63$ V bei Wechselspannung. Die $\pm 0,3$ V bei Gleichspannung entstammen dem unvermeidbaren Pendelvorgang des Integralreglers. Die Abweichung von $\pm 0,63$ V bei Betrieb mit Wechselspannung (entspricht der größten gemessenen Abweichung dieser Arbeit) ist die Kombination des vorher genannten Pendelvorganges und eines „Überschwingens“ des Integralreglers bei Extremwerten der zu regelnden Spannungskurve.

Das unerwünschte Unterschreiten des Minimalwertes von 0 V bei unipolaren Messungen (ausschließlich im positiven Spannungsbereich) wird durch SNAW1.7 abgemildert, jedoch aufgrund der Reglerabweichung nicht völlig verhindert. Der Zielwert von 0 V wird somit mit einer empirischen Genauigkeit von $\pm 0,33$ V, die dem schlechtesten Ergebnis dieser Arbeit entspricht, erreicht. Auch dieser Wert ist im Vergleich mit der bisher verwendeten Messmethode verschwindend gering.

Durch den Einsatz von SNAW1.7 können die Unzulänglichkeiten des bisher zur Generierung von elektrischen Spannungen verwendeten Funktionsgenerators ausgemerzt werden. Diese Unzulänglichkeiten wurden erst durch Messungen in dieser Arbeit als solche erkennbar gemacht. Das mittels SNAW1.7 erzeugte Signal besitzt im Vergleich eine stark reduzierte Welligkeit, keine Inhomogenität und eine exakte Frequenz.

Der prozentuale Fehler der durch SNAW1.7 generierten Sollspannung sinkt mit steigender Amplitude. Das SNAW1.7 ist umso effektiver, je höher diese Spannung gewählt wird.

Start- und Endwert der elektrischen Belastung ist 0 V. Sowohl vor als auch nach der Messung wird die Spannung an der Spannungsquelle auf 0 V gehalten. Dieses Signal wird zwar von SNAW1.7 erzeugt, jedoch nicht geregelt. Eine Abweichung von dieser Vorgabe durch eine Regelabweichung ist somit ausgeschlossen. Weiters sorgt bei Programmabbruch ein in SNAW1.7 integrierter Schutzmechanismus für eine sanfte, automatische Absenkung der elektrischen Spannung am Bauteil auf 0 V, um mögliche Schäden am Aggregat oder Prüfling zu verhindern.

Sowohl die Bedienung des SNAW1.7 als auch der durch dessen Verwendung abgeänderter Versuchsaufbau gestaltet sich als relativ simpel. Eine zusätzlich geforderte Automatisierung inklusive diverser Sicherheitsmechanismen wurde so weit wie möglich in die Tat umgesetzt. Lediglich eine fundamentale Abänderung des Programms erfordert eine fundierte Kenntnis der Programmiersprache LabVIEW.

6.1 Ausblick

Der durch diese Diplomarbeit verbesserte elektromechanische Prüfstand ist für quasistatische Messungen an Piezo-Aktoren konzipiert. Die maximale Frequenz, die das LabVIEW-Programm SNAW1.7 generieren kann, liegt bei 3,33 Hz (100 Punkte pro Periode), siehe Anhang C. Wird dieser Grenzwert überschritten, benötigt die Berechnung eines Punktes der darzustellenden Spannungskurve länger als die dazu zur Verfügung stehende Zeit. Die Folge ist eine inhomogene Kurve mit falscher Frequenz. Weiters kann bei Spannungen mit sehr hohen Frequenzen ein „Wind Up“-Effekt des Integralreglers nicht ausgeschlossen werden.

Für die dynamische Prüfung von Piezo-Aktoren muss ein von Grund auf anderes programmiertechnisches Konzept für eine exakte Ausregelung erdacht werden. Die vorhandenen Geräte des elektromechanischen Prüfstandes sind zum Zeitpunkt

dieser Arbeit unter anderem auch nicht im Stande die Anforderungen für eine dynamische Prüfung zu erfüllen.

Das SNAW1.7 ist lediglich in der Lage, eine stabilisierte, nicht arbiträre Signalform zu erzeugen. Eine weitere Ausbaustufe dieses Programms ist ein Upgrade auf arbiträre Signalformen, um Aktoren mit willkürlich entworfenen, spannungsgeregelten Rampen in Bezug auf Spannung und Zeit, allerdings unter Beachtung der Grenzfrequenz von ca. 3 Hz, prüfen zu können.

Das LabVIEW SNAW1.7 kann grundsätzlich zur Prüfung beliebiger piezoelektrischer Proben und Aktoren verwendet werden, solange eine maximale Ansteuerspannung von 400 V nicht überschritten wird.

7 Anhang

Anhang A:

Programmiertechnische Instrumente

Zum besseren Verständnis der Beschreibung des entwickelten Programms wird ein kurzer Exkurs bezüglich Programmiertechnischer Instrumente in LabVIEW durchgeführt. Dies geschieht aufgrund der im Vergleich zu anderen Programmiersprachen stark abgeänderten Form bzw. Aussehen des Sourcecodes.

While-Schleife

Eine While-Schleife erscheint in LabVIEW als Rahmen mit grau schraffiertem Rand. Rechts unten innerhalb des Rahmens befindet sich ein STOPP, welcher mittels Taster aus dem Frontpanel oder durch eine andere boolesche Bedingung aktiviert werden kann. Wird der STOPP an keine Bedingung geknüpft, erhält man eine Endlosschleife. Die Aufgabe der While-Schleife ist es, die Aufgaben im Rahmen so oft auszuführen und zu wiederholen, bis der STOPP aktiviert wird. Die Dauer pro Durchlauf kann mittels einer Verzögerungs- bzw. Wartezeit festgelegt werden. Wie bei allen anderen Rahmen-Strukturen in Labview werden die aus der Schleife herausführenden Datenleitungen mit den Ergebnissen des gerade durchgeführten Durchganges der Schleife belegt, die wiederum von nächsten Instanzen abgeholt werden können. [Jam, S184-185]

For-Schleife

Die For-Schleife unterscheidet sich von der While-Schleife durch den fehlenden STOPP und die stattdessen im linken oberen und linken unteren Eck situierten blauen Quadraten. Das obere Quadrat trägt ein „N“ für Nummer im Innern. Durch diesen Anschluss, der mit einem Integer-Wert belegt werden muss, wird die Anzahl der Durchläufe festgelegt. Im unteren Quadrat befindet sich ein „i“ für Index. Hier kann die aktuelle Nummer des Durchlaufes abgegriffen werden. Der erste Durchlauf ist nicht wie im Normalfall 1, sondern 0. Beim Verwenden des Index ist somit auf diese Eigenschaft insbesondere zu achten.

LabVIEW bietet aber auch an, eine For-Schleife mit STOPP zu generieren. Es ist somit möglich, die Schleife für eine gewollte Anzahl an Wiederholungen auszuführen. Durch eine boolesche Bedingung kann diese aber trotzdem ohne Rücksicht auf den Index beendet werden. [Jam, S186-187]

Schieberegister

Schieberegister sind für While- und For-Schleifen verfügbar. Diese bestehen aus einem Anschlusspaar, wobei sich eines am linken, das andere am rechten Schleifenrand befindet. Nach Durchlauf der Schleife wird ein Wert am rechten Anschluss, dem Ausgang, gespeichert, der beim darauffolgenden Durchlauf am linken Anschluss, dem Eingang, wieder aufgegriffen wird und der weiteren Berechnung dient. Eine Initialisierung des Schieberegisters, also eine Startwertvorgabe, ist meist sinnvoll. [Jam, S192]

Sequenz-Struktur

Die Sequenz-Struktur ermöglicht die Festlegung einer exakten Reihenfolge, in der Programmteile abgearbeitet werden. Es gilt zu beachten, dass Daten erst nach Abarbeitung sämtlicher Sequenzen die Struktur verlassen. [Geo, S 56]

Eine „Flache Sequenz“ erinnert sowohl optisch als auch funktionstechnisch an einen Polaroidfilm. Es befinden sich mehrere Kästchen nebeneinander, die aber voneinander nicht getrennt werden können. Wie bei einem Film werden die Rahmen von links nach rechts nacheinander abgearbeitet. Standardmäßig werden 3 Kästchen vorgegeben, die Sequenz kann natürlich nach Belieben erweitert werden. [Jam, S209]

Eine „Gestapelte Sequenz“ ist abermals eine rahmenförmige Struktur. Sie hat dieselbe Funktionsweise wie die flache Sequenz, nur sind die Kästchen nicht nebeneinander sondern hintereinander, man blättert also durch die Struktur. Aus diesem Grund sitzt am oberen Rand ein Fenster, in welchem sich eine Zahl (oder auch ein Wort) befindet und die derzeitige Position in der Struktur angibt. [Müt, S175]

State Machine

Die State-Machine ist wie die vorhergehenden programmiertechnischen Werkzeuge eine Rahmenstruktur. Mittig am oberen Rand sitzt ein Fenster mit Text. Es handelt sich um das „Label“, also die Bezeichnung des „States“. Ein State funktioniert grundsätzlich wie eine gestapelte Sequenz. Der entscheidende Unterschied liegt allerdings darin, dass die State-Machine die Sequenz nicht notwendigerweise in einer strengen Reihenfolge durchlaufen muss. Zu allererst müssen die gewünschten States (also Zustände) initialisiert werden. Gewöhnlich werden zumindest „Initialisieren“, „Ausführen“ und „Stopp“ generiert. Außerhalb des State-Machine Rahmens muss der Beginnzustand am linken blauen Quadrat vorgegeben werden. Im Betrieb gibt man durch einen Reiter in jedem State bekannt, in welchen State nach Beendigung des derzeitigen gewechselt wird. Ein Beispiel zur Veranschaulichung:

Eine flache bzw. gestapelte Sequenz durchläuft ihre Fenster immer in der Reihenfolge 0-1-2-3-4. Mit Hilfe der State-Machine kann aber auch 0-1-2-1-3-2-1-3-4 realisiert werden. Nach Durchlauf des letzten States (also z.B. „Stopp“) wird das Werkzeug beendet und es ist kein weiterer Wechsel möglich.

Case-Struktur

Diese Ablaufstruktur ermöglicht eine Ausführung in Abhängigkeit eines Zustandes oder Eingangswertes. Die Case-Struktur setzt sich aus einem Rahmen zusammen und besitzt am oberen Rand einen Reiter, in dem entweder ausschließlich die zwei Zustände „True“ (Richtig) oder „False“ (Falsch) oder aber frei wählbare Zustände bzw. Werte ausgewählt werden können. Er ist somit ein Verwandter der gestapelten Sequenz. Allerdings erfolgt die Abarbeitung nicht hintereinander sondern nur entweder der eine oder der andere Zustand. Wird am blauen Kästchen mit „?“ am linken Rand durch entsprechende Verschaltung ein boolesch „True“ (also 1) angelegt, so wird nur der Zustand „True“ ausgeführt. Bei einem boolesch „False“ (also 0) der andere Zustand. Dieses Bit muss durch virtuelle Bauteile realisiert werden. Ein einfaches Beispiel hierfür wäre: Wert A > Wert B? Diese Struktur ist allzeit aktiv und ermöglicht die automatische Reaktion des Programms auf sich verändernde Zustände bzw. Zahlenwerte. [Jam, S197]

Array & Cluster

Ein Array stellt ein ein- bzw. mehrdimensionales Feld eines einzigen Datentyps dar. Ein Cluster hingegen ist eine Ansammlung von mehreren Datentypen. Man kann sich den Cluster als ein Bündel von Drähten vorstellen, die jeweils eigene, unterschiedliche Information leiten. [Jam, S241]

Array sind nützliche Instrumente z.B. beim mehrfachen Auslesen von Spannungen durch Datenerfassungselemente. Die Information kann durch Indizierung sehr leicht

Anhang B:

Anschluss des SNAW1.7

Der Anschluss des SNAW1.7 anstatt des Funktionsgenerators gestaltet sich als äußerst simpel. Es muss allerdings peinlichst genau darauf geachtet werden, die Verkabelung korrekt auszuführen, da ansonsten ein falsches Verhalten des SNAW1.7 die Folge ist!

Der Monitor-Ausgang des Wechselspannungsgenerators wird mittels T-Stück sowohl mit dem „analog in 0“ Eingang (ai0) des NI-BNC 2110 Anschlussblocks (Abbildung 3c) als auch dem Signalverstärker in Richtung DOLI EDC580 verbunden. Die vom Keithley Sourcemeter 2400 gemessene Spannung an der Vergleichskapazität wird an der Geräterückseite mit zwei Strippen und mit Hilfe eines T-Stücks in den „analog in 1“ Eingang (ai1) des Anschlussblocks geleitet. Weiters wird eine Verbindung des „analog out 0“ Ausgang (ao0) des Anschlussblocks mit dem Input Eingang des Wechselspannungsgenerators hergestellt, siehe Abbildung a und b. Sämtliche verbleibenden Ein- und Ausgänge sind nicht belegt und besitzen somit keine Funktion.



Abbildung a: Verkabelung des Anschlussblocks



Abbildung b: Anschlussbox mit Verkabelung, Detailaufnahme

Zum problemlosen und schnellen Lokalisieren der Ein- bzw. Ausgänge der NI BNC-2110 Anschlussbox dient Abbildung c.



Abbildung c: Anschlussblock, Detailaufnahme

Anhang C:

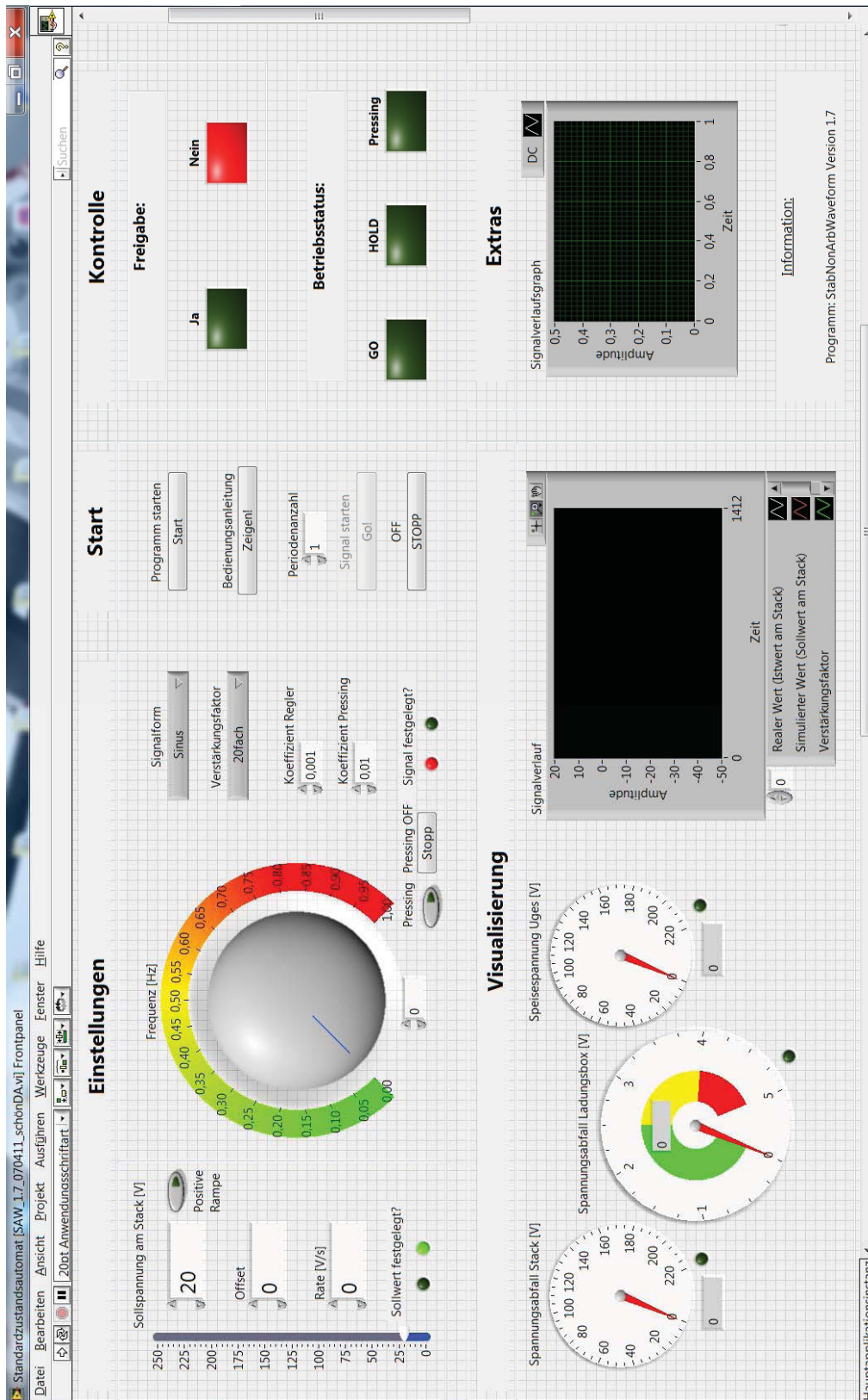


Abbildung d: Frontpanel SNAW1.7

Bedienungsanleitung SNAW1.7

Abbildung d zeigt das Frontpanel des SNAW1.7.

Grundsätzliches

- a) Diese Bedienungsanleitung ist vor Verwendung sorgfältig zu lesen.
- b) Beim Verlassen des Programms niemals speichern, wobei zu beachten ist, dass ein Programmstart (Pfeiltaste) einem „Speichern“ Befehl im Reiter „Datei“ gleichkommt.
- c) Bei regulärem Gebrauch keine Veränderungen im Blockdiagramm vornehmen.
- d) Das Programm kann jederzeit via Betätigung des „OFF-Stopp“-Schalters abgebrochen werden. Es erfolgt in keinem Fall ein abruptes Absinken der Spannung am Stack, denn es wird stets automatisch eine schonende Rampe bis Erreichen von 0 V gefahren. Bleibt dieser Vorgang wirkungslos, wird der rote Punkt neben dem Startpfeil in der linken oberen Ecke der Symbolleiste zu einem (radikaleren) Ausschaltprozess führen, der allerdings einen abrupten Spannungssturz zur Folge haben kann!
- e) Das Programm besitzt Sicherheitsmechanismen. Es lässt sich ausschließlich nach Eingabe aller notwendigen Parameter starten. Dies bedeutet allerdings nicht, dass diese Parameter aus usertechnischer Sicht sinnvoll bzw. korrekt sind! Diese Mechanismen sind durch LEDs visualisiert. Weiters werden nicht benötigte Bereiche des Frontpanels ausgegraut.
- f) Das Programm besitzt eine optionale Funktion mit Namen „Pressing“. Diese Funktion ermöglicht eine Spannungsregelung auf 0 V an der Vergleichskapazität während der mechanischen Belastung des Stacks auf die gewählte Vorspannung.
- g) „Koeffizient Regler“ sowie „Koeffizient Pressing“ dienen dem Verändern von fundamentalen Regler- bzw. Pressing Einstellungen. Diese Parameter sind nicht zu verändern, außer der User besitzt ausreichendes Wissen über die Funktionsweise dieser Programmteile. Ein Verändern dieser Werte kann zu einem Überschwingen, einer zu geringen Ausregelung oder einem noch unbekanntem Verhalten führen.

Eingaben

- 1.) Das Programm muss durch betätigen des Pfeils in der linken oberen Ecke gestartet werden. Die Eingabemaske (Frontpanel) wird somit aktiviert. Eingaben, die vor dem Start vorgenommen wurden, werden wieder rückgesetzt!
- 2.) Zu allererst werden die Basiseinstellungen getätigt. Unter „Einstellungen“ werden die gewünschte Signalform und der Verstärkungsfaktor (Abgleich mit dem Wechselspannungsverstärker HSA 4052!) eingestellt.
- 3.) Wird die Funktion „Pressing“ gewünscht, muss diese durch den Schalter unter dem Frequenz-Drehregler aktiviert werden.

Bei Verwendung von Wechselspannung:

- 4.) Bei der Verwendung von Wechselspannung wird entweder via Drehknopf oder Direkteingabe im Nummernfeld darunter die Frequenz fixiert.
- 5.) Soll die Spannungsrampe ausschließlich im positiven Bereich durchgeführt werden, muss der Schalter „Positive Rampe“ aktiviert werden. Der Maximalwert der Rampe wird nun unter „Sollspannung am Stack“ oder dem Schieberegler daneben eingegeben. Zu beachten: Der Minimalwert dieser Methode ist immer 0 V! Sollen Perioden mit einer individuellen Offsetspannung generiert werden, so darf diese Funktion nicht verwendet werden!
- 6.) Soll die Spannungsrampe sowohl im positiven als auch negativen Bereich gleichmäßig ausgeführt werden, so hat wiederum der Maximalwert (positiv!) unter „Sollspannung am Stack“ eingetragen zu werden.
- 7.) Wird eine zusätzliche Offsetspannung zu den Wechselspannungsperioden gewünscht, wird der Offsetspannungswert im entsprechenden „Offset“-Nummernfeld eingetragen (positiv!). Im Nummernfeld „Rate“ muss die Steilheit der gefahrenen Offsetrampe in V/s festgelegt werden. Achtung! Die „Sollspannung am Stack“ gibt in diesem Fall die Amplitude der unüberlagerten Spannung an. Somit muss die Offsetspannung zum Maximalwert der

Wechselspannung addiert werden! Weiters wird die Offsetrampe nicht spannungsgeregt!

- 8.) Die gewünschte Anzahl von generierten Perioden wird unter Punkt „Periodenanzahl“ eingegeben. Weiter zu Punkt 9.

Bei Verwendung von Gleichspannung:

- 4) Bei Gleichspannung braucht lediglich der gewünschte Gleichspannungswert unter „Offset“ eingetragen werden.
- 5) Die Spannungsrampe (V/s), mit der die gewählte Gleichspannung angefahren wird, ist unter „Rate“ einzugeben. Weiter bei Punkt 9.

- 9.) Der Programmstart erfolgt, nachdem unter „Kontrolle“ eine Freigabe durch die Sicherheitsmechanismen erhalten wird, durch das Drücken der „Start“-Taste.
- 10.) Das Programm befindet sich nun im „Hold“-Modus, einer Warteschleife. In dieser Zeit können Eingaben und Messaufbau vom User ein letztes Mal überprüft oder Proben bis zur mechanischen Vorspannung belastet und anschließend mit der Ladungsbox verbunden werden. Das System ist allerdings „scharf“ und wartet auf den Startschuss. Ein Abbruch kann durch Betätigen des „OFF-Stopp“-Schalters herbeigeführt werden.
- 11.) Durch das Drücken der „Signal starten-Go“-Schaltfläche beginnt die Ausführung des Programms (wie im Vorfeld gewählt) entweder mit oder ohne „Pressing“.
- 12.) Befindet man sich im „Pressing“-Modus, muss das Abfahren der Spannungsrampe(n) erneut durch das Betätigen des „Pressing off-Stopp“-Schalters zum gewünschten Zeitpunkt gestartet werden.
- 13.) Ist das Programm vollständig ausgeführt, erfolgt die Beendigung automatisch.

Weitere Hinweise:

- a) Der Programmstatus kann jederzeit unter Betriebsstatus durch die jeweiligen LEDs abgelesen werden.
- b) Unter Extras kann die Signalform (Phasenlage etc.) der Signalgeneratoren für sämtliche Signalformen abgelesen werden.
- c) Unter Visualisierung können die aktuellen Daten der Versuchsdurchführung entnommen werden.
- d) Im Diagramm „Signalverlauf“ werden Sollspannung am Stack, Istspannung am Stack und der Verstärkungsfaktor ausgegeben.
- e) Unter „Extras“ werden im „Signalverlaufsgraph“ die Signalformen der Signalgeneratoren (und somit ohne Einbezug des Verstärkungsfaktors) angezeigt.
- f) Die Istwerte Spannung am Stack, Spannung an der Vergleichskapazität sowie Gesamtspannung können an den Drehmessgeräten abgelesen werden, wobei deren rote LEDs auf eine negative Spannung hinweisen.
- g) Das SNAW1.7 ist für quasistatische Messungen bis zu 0,33 Hz konzipiert. Möchte man Frequenzen jenseits von 0,33 Hz generieren, so hat man zusätzlich einem weiteren Diagramm namens „Schleifendurchlaufzeit“, situiert im Frontpanel direkt unter dem „Signalverlauf“-Diagramm, Aufmerksamkeit zu schenken.
- h) Bei einer Frequenz von über 0,33 Hz darf die Schleifendurchlaufdauer nicht mehr als 3 ms betragen. Im Normalfall liegt dieser Wert bei 2 ms, es kommen 3 ms allerdings sporadisch vor, fallen aber keinesfalls ins Gewicht. Als absoluter Grenzwert mit minimaler auftretender Ungenauigkeit darf hiermit 0,5 Hz angenommen werden. Die Formel zur Berechnung der maximal exakt darstellbaren Frequenz durch SNAW1.7 lautet wie folgt:

$$f_{\max} = \frac{1}{T}$$

Formel 7.1

f_{\max} ...maximale darstellbare Frequenz [Hz]

T ...Periodendauer [s]

wobei

$$T = t_s \cdot P_{pp}$$

Formel 7.2

t_s ...Zeit pro Schleifendurchlauf [s]

P_{pp} ...Punkte pro Periode []

- i) Soll eine noch höhere Frequenz durch das SNAW1.7 generiert werden, so haben durch das Öffnen der Signalgeneratoren (jeder Generator einzeln!) im Blockdiagramm die Sampleanzahlen pro Periode von 1000 auf 100 gesenkt zu werden. Nun sind Frequenzen bis zu 3,33 Hz (bei wiederum 3 ms Durchlaufzeit) theoretisch möglich, die Genauigkeit sowohl der Signaldarstellung als auch der Spannungsausregelung sinkt jedoch drastisch.
- j) Als absolute Obergrenze des SNAW1.7 dürfen 6,66 Hz angesehen werden. Hierzu dürfen nur mehr 50 Punkte pro Periode dargestellt werden. Von „glatter“ bzw. ausgeregelter Kurve kann nicht mehr die Rede sein. Es wird nicht empfohlen, unter 100 Punkte pro Periode zu sinken.

Warnung: Das Verwenden von Frequenzen über 0,33 Hz kann ohne Abänderung des Blockdiagramms des SNAW1.7 zu ungenau generierten Signalformen und somit unbrauchbaren Versuchsergebnissen führen!

Anhang D:

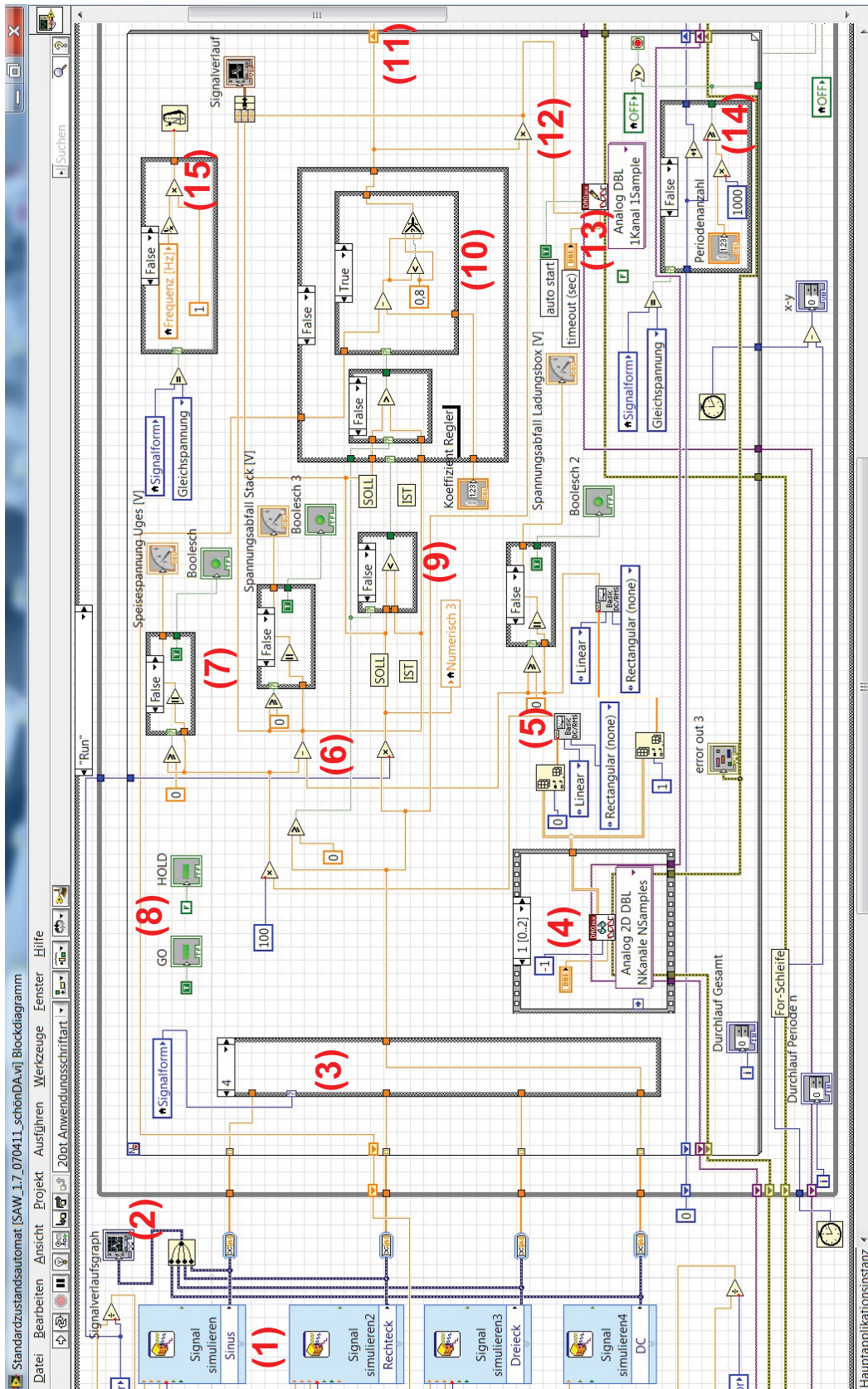


Abbildung e: Run-State des SNAW1.7

Der „Run“-State

Die folgenden Programmbereiche sind nummeriert und in Abbildung e eingezeichnet.

- (1) Die Signalgeneratoren generieren die jeweilige Signalform in jeweils 1000 einzelnen Punkten pro Periode und speisen diese hintereinander in die While-Schleife. Pro Schleifendurchlauf wird somit nur ein einzelner Punkt abgehandelt!
- (2) Der Signalverlaufsgraph gibt die Signalform im Frontpanel unter „Extras“ aus.
- (3) Eine Case-Struktur leitet nur die gewählte Signalform weiter. Die verbleibenden Signalformen werden somit zwar generiert, jedoch nicht weiter verwendet und ausgeblendet.
- (4) Die Datenerfassungseinheit sitzt in einer gestapelten Sequenz und erfasst sowohl Gesamtspannung und die Spannung an der Vergleichskapazität und versendet diese via Array. Weiters hat in dieser Sequenz die Zeitmessung pro Datenerfassung ihren Sitz.
- (5) Die im Array indizierten Daten werden aufgespaltet und ausgelesen.
- (6) Errechnung des Istwertes am Aktor durch Subtraktion des Spannungsabfalls an der Vergleichskapazität von der Gesamtspannung.
- (7) Case-Strukturen bilden den Betrag aus den Spannungswerten und speisen damit die Drehmessgeräte, welche im Frontpanel ihren Sitz haben. Weiters wird bei negativen Spannungen das Negativ-LED aktiviert.
- (8) Die zur Kontrolle des Betriebszustandes im Frontpanel integrierte optische Anzeige „Hold“ wird rück- und gleichzeitig „Go“ gesetzt.

- (9) Case-Strukturen zur Steuerung des Reglers in Abhängigkeit ob die Istspannung größer als die Sollspannung ist oder nicht.
- (10) Case-Struktur, welche im Falle einer zu niedrigen Istspannung die Stellgröße pro Schleifendurchlauf um den im Frontpanel einstellbaren Reglerkoeffizienten erhöht. Ist die Istspannung jedoch zu hoch, wird diese Stellgröße um eben diesen Koeffizienten pro Durchlauf vermindert. Ist die Istspannung gleich der Sollspannung, so bleibt die Stellgröße in diesem Durchlauf unverändert. Zusätzlich wurden als Sicherheitsmaßnahme obere und untere Grenzen (inklusive „Anti-Wind Up-Maßnahme“) integriert. Die Stellgröße kann dadurch einen Maximalwert von 1,2 (120%) bzw. Minimalwert von 0,8 (80%) annehmen.
- (11) Übergabe der Stellgröße an das Schieberegister zur erneuten Verwendung im darauffolgenden Schleifendurchlauf.
- (12) Multiplikation der Stellgröße mit dem Sollwert.
- (13) Übergabe des manipulierten Sollwertes an die Schreibeinheit, welche das Signal via Datenerfassungsmodul und Anschlussblock an den Wechselspannungsgenerator in analoger Form übergibt.
- (14) Case-Struktur zur gewollten Beendigung der gesamten Struktur nach Abarbeitung der gewünschten Periodenanzahl bzw. der Endlosschleife bei Verwendung von Gleichspannung.
- (15) Case-Struktur zur exakten Generierung der gewünschten Frequenz. Die Berechnung erfolgt aufgrund der Eingabe der Frequenz und den in den Signalgeneratoren festgelegten Anzahl von 1000 gezeichneten Punkten pro Periode. Bei Gleichspannung werden automatisch 10ms bei 1000 Einzelwerten pro Periode vorgegeben. Diese Zeitvorgaben werden einem Warteglied übermittelt, welches erst nach Ablauf ebendieser Zeitspanne die Schleife schließt, obwohl die gesamte Berechnung der Durchlaufschleife längst durchgeführt ist.

8 Literaturverzeichnis

[Dud] Duden, (1999), Duden Grundwissen Physik, Bibliographisches Institut & F. A. Brockhaus AG

[Nye] J. F. Nye, (2001), Physical Properties of Crystals, Oxford University Press

[Jaf] B. Jaffe, (1971), Piezoelectric Ceramics, Academic Press London and New York

[Mou] A. J. Moulson, J.M. Herbert, (2003), Electroceramics, John Wiley & Sons

[Del] M. Deluca, (2009), Raman spectroscopy for the non-destructive investigation of crystallographic orientation and residual stress in ferroelectric ceramics, Doctoral Dissertation Kyoto Institute of Technology

[Set] N. Setter, (2002), ABC of piezoelectricity and piezoelectric materials, Swiss Federal Institute of Technology

[Fac] Fachkunde Industrieelektronik und Informationstechnik, (1997), Verlag Europa Lehrmittel

[Wer] W. Wersing, (2002), Applications of piezoelectric materials: an introductory review, Siemens AG Corporate Technology

[Web] M.-A. Weber, M. Kamlah, D. Munz, (2000), Experimente zum Zeitverhalten von Piezokeramiken, Institut für Materialforschung, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH

[Kuc] H. Kuchling, (2001), Taschenbuch der Physik, 17.Auflage, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag

[Müt] B. Mütterlein, (2009), Handbuch für die Programmierung mit LabVIEW, 2. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag

[SRT] Skriptum Regelungstechnik, Kapitel 4, Technikum Bad Radkersburg, Jahrgang 1999/2000

[SRI] Skriptum Regelungs- und Systemtechnik, (2010), Institut für Elektrotechnik, Montanuniversität Leoben

[Hor] M. Horn, N. Dourdoumas, (2004), Regelungstechnik, Pearson Studium

[Jam] R. Jamal, A. Hagestedt, (2004) LabVIEW: Das Grundlagenbuch, 4. Auflage, Addison-Wesley Verlag München

[Geo] W. Georgi, E. Metin, (2006), Einführung in LabVIEW, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag