



Hochschule für Angewandte
Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorthesis

(Prüfungsexemplar)

Zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Engineering

Entwicklung und Konstruktion einer dynamischen Diamantstempelzelle

Eugen Wittich

Studiengang: Maschinenbau
Fachrichtung Entwicklung und Konstruktion

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Beyer

Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Jan Holländer

Beginn: 13.12.2012

Tag der Abgabe: 13.03.2013

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit ist eine Vorrichtung zum Durchführen von dynamischen Experimenten am Messplatz P02.2 am DESY Hamburg zu entwickeln und zu konstruieren.

Durch Erzeugung eines Druckprofils auf die Materialprobe, soll eine Änderung der Kristallstruktur hervorgerufen werden, die mit Röntgenstrahlen der Messstrecke untersucht werden kann. Die Anregung der Probe soll im Millisekunden Bereich liegen und einer Periodischen Funktion bestimmter Form (Rampe, Sinus, Dreieck etc.) gehorchen.

Für die Weiterentwicklung wurde die existierende Apparatur der Wissenschaftler des Lawrence Livermore National Laboratory genauer betrachtet und analysiert. Anhand der Erkenntnisse konnten Verbesserungen in die Konstruktion implementiert werden, die in dieser Arbeit genauer beschrieben werden.

Inhalt

Kurzfassung	II
Inhalt	III
Abkürzungsverzeichnis	V
Formelzeichenverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
2 Vorstellung des Unternehmens	1
3 Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung	2
3.1 Messplatz P02.2 „Extreme Conditions Beamline“	2
3.2 Dynamische Diamantstempelzelle (dDAC)	4
3.3 Das dDAC Experiment bei der ECB.....	6
3.4 Anforderungsliste	7
4 Konzipieren	9
4.1 Funktionstruktur	10
4.2 Systematische Entwicklung von Lösungsansätzen	12
4.2.1 Lösungsvariante 1.....	13
4.2.1 Lösungsvariante 2.....	14
4.2.1 Lösungsvariante 3.....	14
4.3 Bewertung der Lösungsansätze.....	17
5 Entwerfen	19
5.1 Auslegung der Piezostapelaktoren.....	19
5.1.1 Grundlagen	19
5.1.2 Kräfte und Wege	20
5.1.3 Marktrecherche und Auswahl der PE-Aktoren	25
5.1.4 Hinweise zur konstruktiven Gestaltung	29
5.2 Heizung.....	30
5.3 Design der dynamischen Diamantstempelzelle.....	34
5.3.1 Gehäuse	34

Inhalt

5.3.2	Montage der Piezostapelelemente.....	36
5.3.3	Zusammenbau.....	38
5.4	Steuerung	38
6	Zusammenfassung/Ausblick.....	41
7	Literaturverzeichnis	42
8	Anhang.....	43
9	Eidesstattliche Erklärung	44

Abkürzungsverzeichnis

DAC	Diamantstempelzelle
dDAC	Dynamische Diamantstempelzelle
PETRA III,	Positron-Elektron-Tandem-Ring-Anlage, dritte Generation
DESY	Deutsches Elektronen-Synchrotron
HASYLAB	Hamburger Synchrotron-Labor
LLNL	Lawrence Livermore National Laboratory
ECB	Extreme Conditions Beamline
PE-Aktoren	Piezoelektrische Aktor
L	Länge
B	Breite
H	Höhe
BNC	Bayonet Nut Connector
RS232	Recommended Standard
LV	Lösungsvariante
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
Endstk.	Endstück
DMS	Dehnungsmessstreifen
UHV	Ultrahochvakuum

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen, Bezeichnung

p	Druck [Pa]	μ_G	Reibungszahl im Gewinde [-]
F	Kraft [N]	μ_K	Reibungszahl am Schraubenkopf [-]
F_R	Reibungskraft [N]	C	Kapazität [F]
F_N	Normalkraft [N]	U	elektrische Spannung [V]
F_{KL}	Klemmkraft [N]	P_m	mittlere elektrische Leistung [W]
F_a	Axialkraft [N]	\bar{I}	mittlerer elektrischer Strom [A]
F_{VM}	Montage-/ Vorspannkraft [N]	\hat{I}	Peakstrom/Spitzenstrom [A]
D	Durchmesser [m]	T_{min}	Zeit [s]
r	Radius [m]	P	Punkt (Bewertung) [-]
A	Fläche [m ²]	g	Gewichtungsfaktor [-]
V	Volumen [m ³]		
r	Radius [m]		
x	Weg [m]		
f	Frequenz [Hz]		
f_0	Resonanzfrequenz [Hz]		
k	Anzahl Schrauben [-]		
K_A	Betriebsfaktor [-]		
S_H	Haftsicherheit [-]		
E	Elastizitätsmodul [Pa]		
α	Winkel [°]		
ε	Dehnung [%]		
ε_{el}	elastische Dehnung [%]		
M_A	Anzugsdrehmoment [Nm]		
φ	Steigungswinkel des Gewindes [°]		
d_K	wirksamer Reibungsdurchmesser [m]		

Indizes

ges	gesamt
eff	effektiv
min	Minimum
max	Maximum
stat	statisch
dyn	dynamisch
transl	translatorisch
Block	blockier-
TF	Tellerfeder
Hubrtng	Hubrichtung

1 Einleitung

In dieser Bachelorarbeit geht es um eine Weiterentwicklung der sogenannten dynamischen Diamantstempelzelle (dDAC)¹, einer Vorrichtung, die es ermöglicht, eine zeitabhängige, druckinduzierte Änderung in der Kristallstruktur einer Materialprobe zu erforschen. Die Probe wird zwischen zwei Diamantstempeln komprimiert und mit Hilfe von elektromechanischen Aktuatoren zusätzlich mit einer wechselnden Last beaufschlagt. Dabei soll die zeitabhängige Komprimierung der Probe durch einen Frequenzgenerator gesteuert werden.

Die Weiterentwicklung ist für die Messstrecke P02.2 (Extreme Conditions Beamline) an der Röntgenstrahlungsquelle dritten Generation, PETRA III, am DESY Hamburg zu konzipieren. Deshalb werden bei der Konstruktion die Anforderungen des besagten Experimentaufbaus vorrangig bemessen.

Als Grundlage für die Weiterentwicklung steht die existierende Vorrichtung des William J. Evans (Evans u.a. 2007, Lawrence Livermore National Laboratory) zur Verfügung. Die Verbesserungs- bzw. Optimierungsvorschläge sowie die Anforderungen der Messstrecke sind bei der Konstruktion in Betracht zu ziehen.

2 Vorstellung des Unternehmens

Das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY ist ein Forschungszentrum der Helmholtzgemeinschaft, gegründet am 18. Dezember 1959 in Hamburg. Nach der Wiedervereinigung bekam DESY einen zweiten Standort in Zeuthen in Brandenburg. DESY entwickelt, baut und betreibt große Teilchenbeschleuniger und erforscht damit die Struktur der Materie. Die Kombination von Forschung mit Photonen und Teilchenphysik bei DESY ist einmalig in Europa. Heutzutage arbeiten bei DESY rund 2000 Mitarbeiter, ca. 650 davon sind die Wissenschaftler aus den Bereichen Beschleunigerbetrieb, Forschung und Entwicklung. Die Einrichtungen von DESY werden jährlich von über 3000 Gastforscher aus 40 Nationen genutzt. [2] Das Forschungsspektrum von DESY wird in drei große Schwerpunkte unterteilt: Bau und Betrieb der Teilchenbeschleuniger, Teilchen- und Astroteilchenphysik sowie die Forschung mit Photonen, mit der auch diese Arbeit in Beziehung steht.

¹ dDAC – (engl.) Dynamic diamond anvil cell (dDAC): A novel device for studying the dynamic-pressure properties of materials
William J. Evans, Choong-Shik Yoo, Geun Woo Lee, Hyunchoe Cynn, Magnus J. Lipp et al.

3 Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung

Für das Messplatz P02 bei Desy ist eine Apparatur zu konstruieren, die es ermöglicht zeitabhängige, druckinduzierte Änderungen an Materialproben zu erforschen. Als Grundlage für die Weiterentwicklung steht die sogenannte dynamische Diamantstempelzelle (dDAC)¹, eine Entwicklung von Wissenschaftlern des Lawrence Livermore National Laboratory(LLNL), Livermore, California 94551, zur Verfügung. Das neue Produkt soll unter Berücksichtigung der Bedingungen an der Messstrecke P02.2 beim DESY konstruiert werden. Ferner soll die vorhandene Vorrichtung genauer analysiert werden, um eventuelle Verbesserungen und Optimierungen in die Neukonstruktion mit einfließen lassen zu können.

3.1 Messplatz P02.2 „Extreme Conditions Beamline“

Der Zweck der Extreme Conditions Beamline (ECB) ist die Bereitstellung der Ausrüstung für die Untersuchungen von Materialien bei extremen Probenumgebungen (hohe/tiefe Temperaturen, hoher Druck), um insbesondere zeitaufgelöste Prozesse der dynamischen Phänomene im Kristallaufbau der Materialien zu erforschen (nanokristalline Materialien). Die hohe Qualität der Messergebnisse ist gegeben dank hoher Brillanz und kleinem Fokus des harten Röntgenstrahls des Speicherringes PETRA III, einer der weltweit führenden Synchrotron-Anlagen bei DESY.

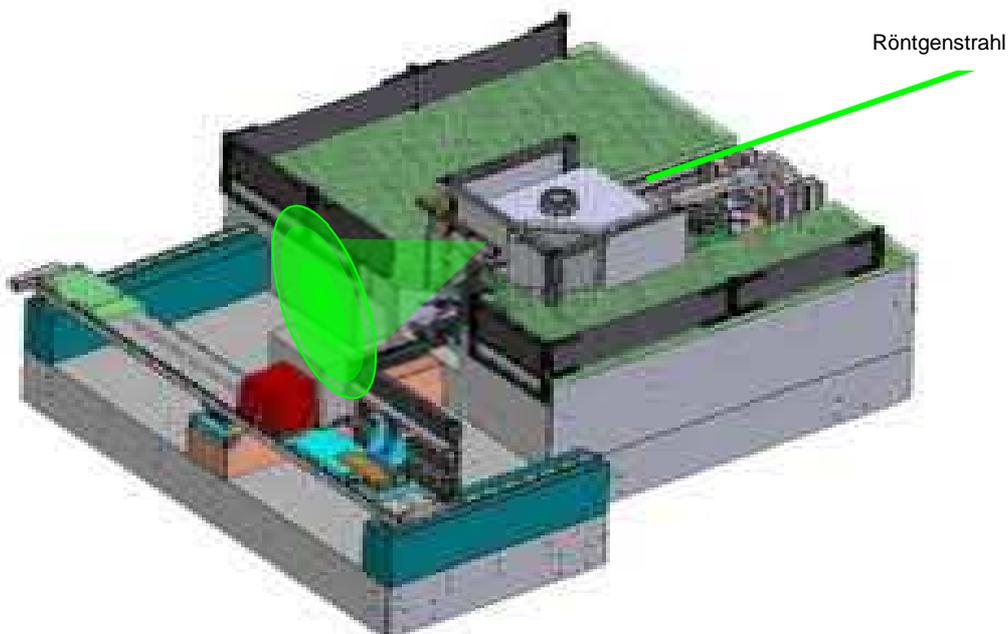


Abbildung 3.1: Aufbau der Extreme Conditions Beamline (Quelle: ...)

¹ dDAC – dynamic Diamond Anvil Cell

Auf der Abbildung 3.1 ist der Aufbau des Experiments von P02.2 dargestellt. Der Röntgenstrahl der Beamline wird zunächst fokussiert und trifft dann auf die Probe. Durch die Beugung an den Atomen des kristallinen Aufbaus, entsteht hinter der Probe ein spezifisches Beugungsmuster, welches mit Hilfe von speziellen Detektoren dargestellt werden kann und den Wissenschaftlern Aufschluss über die Kristallstruktur der Probe liefert. Die Messungen werden unter einer Zeitauflösung von Hundertstel Millisekunden durchgeführt. Der Druckbereich der ECB-Experimente liegt weit über dem Niveau selbst einer leistungsstarken Hydraulikanlage und erreicht bei manchen Experimenten den Wert von ca. 200 GPa. Was ungefähr dem Zweimillionfachen des atmosphärischen Druckes entspricht. Um die Probe auf einen Druck von über 4 GPa zu komprimieren, kommt bei den Experimenten der ECB die sogenannte Diamantstempelzelle (DAC) zum Einsatz, welche in dieser Arbeit betrachtet und erweitert werden soll. Die Prinzipskizze der DAC ist der Abbildung 3.2 zu entnehmen. Ein Metallplättchen aus Rhenium von ca. 20...40 µm Dicke wird zunächst von zwei Diamanten der DAC zusammengedrückt, sodass im Metall ein Abdruck der Stempelflächen entsteht. Die gestauchte Fläche wird mit einem Durchmesser von ca. 0,01 mm durchgebohrt. Die präparierte Metalldichtung, oder auch Gasket¹ genannt, umschlossen von zwei Diamantstempeln (Anvils)², bildet eine Probenkammer, die mit der zu erforschenden Probe gefüllt wird. Die vier Schrauben der DAC erzeugen eine Last auf die Anvils, was zur hohen Kompression der Probe führt.

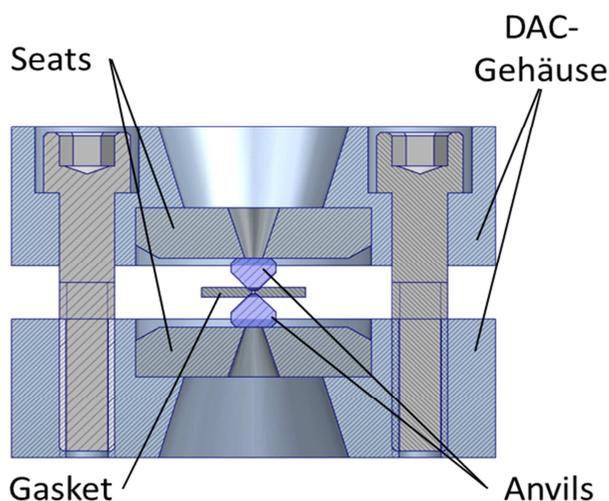


Abbildung 3.2: Diamantstempelzelle
(Schnittdarstellung)

Die Hartmetallsitze (Seats)³ aus Metall, wie z.B. Wolframcarbid, gewährleisten den sicheren Kraftfluss und Halt der Diamanten. Die Form der DAC und die Transparenz der Diamanten bieten die Möglichkeiten zur Röntgenuntersuchungen sowohl als auch zur optischen Beobachtungen der Probe während des Experiments. Bedingt durch die Vielzahl verschiedener Hochdruck - und Hochtemperaturrexperimente werden je nach

¹ Gasket – (engl.) Dichtung

² Anvil – (engl.) Stempel

³ Seats – (engl.) Sitz

Bedarf verschiedene Zelltypen verwendet. Bei dieser Konstruktionsarbeit wird die Kompatibilität des Produktes mit zwei Zelltypen gefordert: „Symmetrische“ und „Pistonzylinder“¹.

3.2 Dynamische Diamantstempelzelle (dDAC)

Die dynamische Diamantstempelzelle ist eine neuartige Entwicklung zur Durchführung von dynamischen Hochdruck- und Hochtemperaturexperimente. Das Gerät lässt sich vereinfacht als eine Erweiterung des Aufbaus der konventionellen Diamantstempelzelle (DAC) vorstellen. Die DAC wird zusätzlich mit piezoelektrischen Aktuatoren (Piezomechanik GmbH, Modell PSt 150/20/18 VS25) versehen, die über einen Verstärker (Piezo Jena, Modell ENT400/ENV400) an einen Funktionsgenerator (Agilent, Modell 33120A, 15MHz) angeschlossen sind.

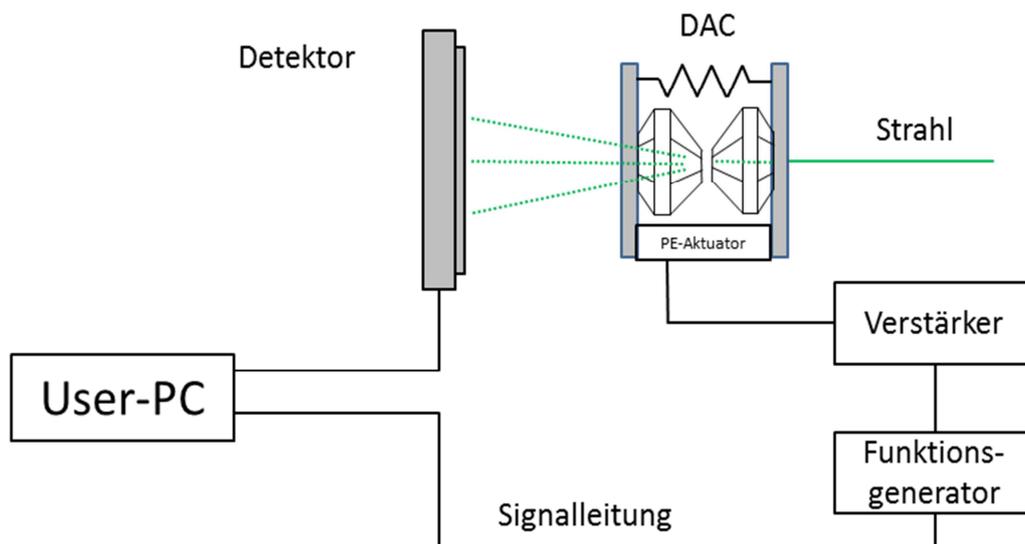


Abbildung 3.3: Aufbau des dDAC-Experiments

Mit dem auf der Abbildung 3.3 dargestellten Aufbau lassen sich verschiedene Druckprofile auf die Probe erzeugen, was die Untersuchung der Kristallstruktur bei dynamischer Belastung ermöglicht. Das Aufbringen der Hauptbelastung geschieht konventionell über die Schrauben der Diamantstempelzelle, die Piezomotoren dienen lediglich der Oszillation um die Ruhelage der beiden Stempel. Die Übertragung der Kräfte geschieht entweder direkt über das Gehäuse der DAC oder über eine Druckscheibe (siehe Abbildung 3.3), die einen sicheren Kraftfluss von den Aktuatoren zur Zelle ermöglicht. Die oszillierende Bewegung der dDAC ist die zentrale Funktion der Vorrichtung, die zunächst genauer untersucht wird.

¹ „Symmetrische“ und „Pistonzylinder“ sind die betriebsinternen Bezeichnungen

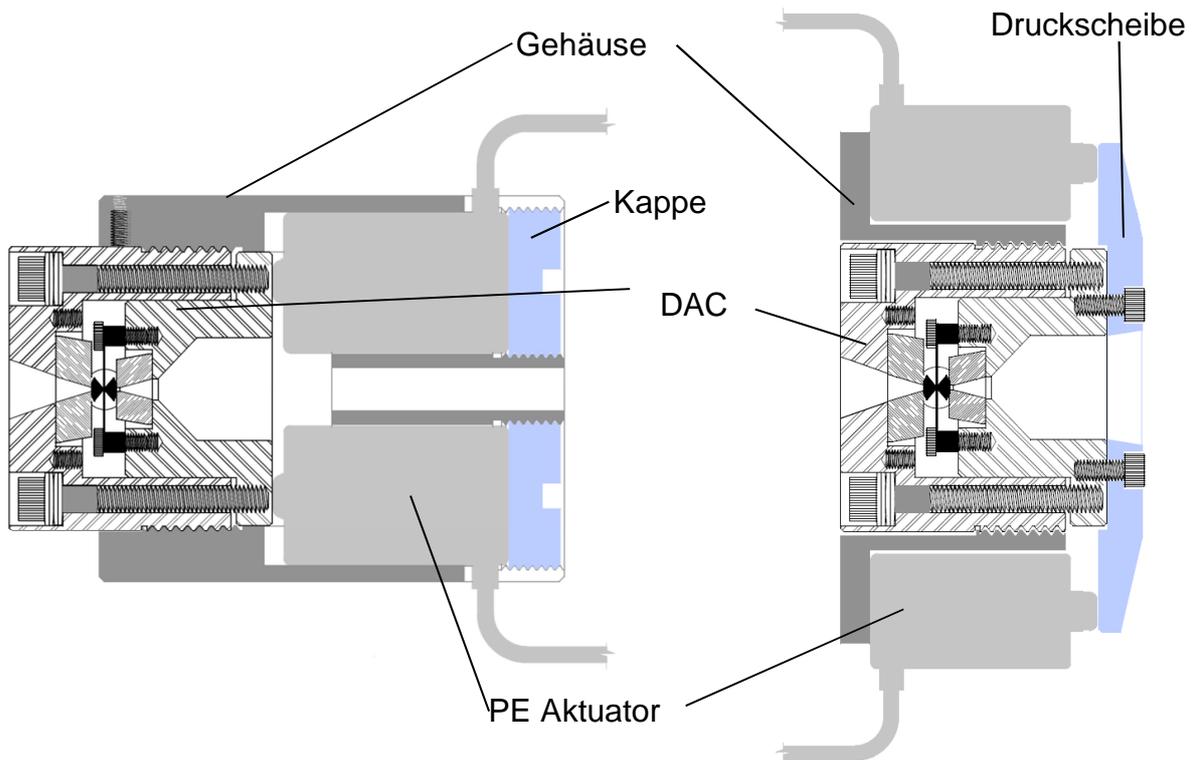


Abbildung 3.3: Dynamische Diamantstempelzelle, stauchend (links) und ziehend (rechts)

Die Abbildung 3.3 zeigt die zwei Aufbauvarianten der dDAC, ziehend und stauchend. Die beiden Varianten unterscheiden sich in der Richtung der Kraft bzw. der Verschiebung, die von den PE-Aktuatoren ausgeführt wird. Bei der Durchführung des Experimentes mit der Anordnung *stauchend* wird die Diamantstempelzelle mit Hilfe von 4 Schrauben auf den minimalen gewünschten Druck p_{min} eingestellt und im Gehäuse der Vorrichtung montiert. Um die gleichmäßige Verteilung der Kräfte zu gewährleisten, werden die Verschlusskappen der PE-Aktuatoren mit dem gleichen Drehmoment von ca. 0,026 Nm angezogen. Die Einstellung des Druckes p_{min} kann anschließend nachjustiert werden. Durch die Kraft der wird die Zelle gestaucht, und der Druck im Bereich der Probe steigt. Die vorgesehenen Tellerfedern erlauben eine Auslenkung der DAC um einige Hundertstel Millimeter. Im Betrieb werden die Piezo-Stackelemente mit einer Wechselspannung von 0 bis ca. 150 V betrieben, die den gewünschten Druckverlauf in der Materialprobe hervorruft. Durch den Frequenzgenerator kann die Spannungs- bzw. der Druckfunktion beliebig je nach Wunsch des Anwenders eingestellt werden (sinus-, dreiecks-, rechtecks- und sägezahnförmig). Eine qualitative Darstellung des sinusförmigen Druckprofils ist der Abbildung 3.4 zu entnehmen. Die Funktionsweise der dDAC bei der Anordnung *ziehend* ist bis auf die Einstellung des Druckes in der

Zelle der Anordnung *stauchend* ähnlich. Entsprechend der Wirkung der Aktoren, wird der Kammerdruck auf den gewünschten maximalen Druck p_{\max} eingestellt. Die Zelle wird mit der Druckscheibe versehen und im Gehäuse verschraubt. Über die Scheibe üben die PE-Aktoren eine Zugbelastung auf die Zelle aus, die dem Druck p_{\max} entgegen wirkt.

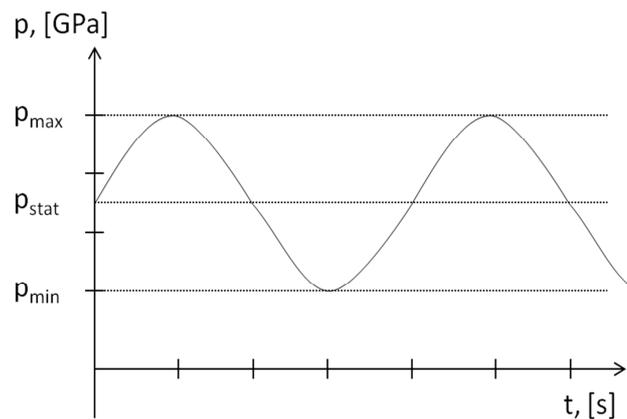


Abbildung 3.4: zeitaufgelöste Druckänderung in der Probenkammer der DAC

3.3 Das dDAC Experiment bei der ECB

Die neue dynamische Diamantstempelzelle soll das Equipment der Extreme Conditions Beamline erweitern und somit neue Möglichkeiten den Wissenschaftlern auf dem Feld Material- und Geoforschung bieten. Um das zu ermöglichen sind mehrere Aspekte bei der Konstruktion zu berücksichtigen. Während der Planungsphase in den Diskussionsrunden mit den Beteiligten Wissenschaftlern und Fachpersonen wurden folgende Rahmenbedingungen definiert:

- Das neue Produkt soll universell mit den Zellentypen „Symmetrisch“ und „Pistonzylinder“ einsetzbar sein
- Es sind keine Änderungen der Probenzellen vorzunehmen
- Das Heizen der Probe bis mindestens 500°C muss möglich sein
- Die Form und das Frequenz des zeitabhängigen Druckprofils muss variabel sein
- Die Anregung mit piezoelektrischen Aktoren wird aufgrund der hohen Präzision und der kurzen Reaktionszeit angestrebt
- Der Aufbau soll robust und präzise sein
- Der Aufbau soll leicht montierbar und zugänglich für Benutzer sein
- Der (ein- und austretende) Strahlengang darf von der Konstruktion nicht beeinflusst werden
- Eine Kompatibilität mit dem Strahlengang der Laserheizung ist erwünscht
- Termin der Fertigstellung am 13.03.2013 wird angestrebt

Im Laufe der konstruktiven Phase werden die genannten Rahmenbedingungen anhand weiterer Annahmen und Berechnungen präzisiert und in der Anforderungsliste aufgezeichnet.

3.4 Anforderungsliste

Die Anforderungsliste liefert die Informationen, die im Laufe der Planungsphase gesammelt wurden. Da es in dieser Arbeit um eine spezielle Anwendung handelt, die keine weite Verbreitung in der Forschungs- und Industriebereichen findet, wurden einige Parameter anhand der Annahmen, gesammelten Erfahrungen mit der bestehenden dDAC fest definiert.

			Anforderungsliste	Identnummer	1904
			Projektbezeichnung: Dynamische DAC	Klassifizierung:	
			Projektnummer: 1904	Erstellt am:	18.12.2012
				Erstellt von:	Eugen Wittich
				Anzahl Blätter:	3
Lfd.	Änderung / Datum	F / W	Anforderungen		
			Funktion		
1	18.12.2012	F	Die Vorrichtung soll die Durchführung der dynamischen Experimente an ECB ermöglichen		
2	18.12.2012	F	Die Vorrichtung soll einen zeitabhängigen Last- bzw. Druckprofil auf eine Materialprobe aufbringen.		
3	18.12.2012	F	Die Erzeugung des Druckes soll durch Stauchen bzw. Ziehen und Entspannen einer herkömmlichen Diamantstempelzelle geschehen		
4	18.12.2012	F	Die Druckänderung soll einer periodischen Funktion gehorchen (Sinus-, Dreieck-, Rechteckkurven usw.)		
5	18.12.2012	F	Die Oszillation soll um einen einstellbaren, statischen Druck erfolgen (bis 200GPa)		
6	18.12.2012	W3	Die Aufbringung der <i>veränderlichen</i> Last soll mit Hilfe von elektro-mechanischen Aktuatoren realisiert werden		
7	18.12.2012	W1	Die Korrektur der <i>konstanten</i> Last soll mit Hilfe von elektro-mechanischen Aktuatoren realisiert werden		
8	18.12.2012	F	Elektrische Widerstandsheizung, soll das Erwärmen der Probe bis 500°C ermöglichen.		
9	18.12.2012	W3	Tauglichkeit für die Laserheizung (Temp. ca. 3000°C) soll gegeben sein		
10	18.12.2012	F	Der Schutz vor Überhitzung der Piezoelemente soll durch die ausreichende Wärmeabfuhr gegeben sein		

Legende: F = Forderung, W3 = Sehr wichtig, W2 = wichtig, W1 = Interessant / wenn möglich

Tabelle 3.1: Anforderungsliste: Blatt 1 von 3

Geometrie / Masse				
11	18.12.2012	F	Die Vorrichtung soll sowohl mit "symmetrischen" ($\varnothing 48$ mm) als auch mit "Pistonzylinder" ($\varnothing 50,8$) (Diamantstempelzellen einsetzbar sein	23.01.2013
12	18.12.2012	F	Die Vorrichtung soll an eine Vorgesehene Probenhalterung (Newport BK4) montierbar sein	
13	18.12.2012	F	Das Gewicht oder die Abmaße der Vorrichtung dürfen die Apparatur der Beamline nicht beeinflussen ($m \leq 15\text{kg}$; $L \leq 120$ mm; $B \leq 150$ mm; $H \leq 250$ mm)	18.01.2013
14	18.12.2012	W2	Die Abmaße und Gewicht der Vorrichtung sollen möglichst gering gehalten werden	
15	18.12.2012	W3	Die Geometrie der Vorrichtung soll tauglich für Laserheizung sein (Einfallswinkel ca. 24°)	07.02.2013
Kräfte				
13	19.12.2012	F	Die Kraft darf nur in Axialer Richtung wirken (Toleranzwinkel $\alpha \leq 3,4^\circ$)	27.02.2013
14	19.12.2012	F	Die Druck-/Zugkraft des Antriebes soll möglichst hoch sein ($F \geq 14000\text{N}$)	23.01.2013
15	19.12.2012	F	Die Vorrichtung bzw. DAC dürfen unter der Einwirkung der maximalen Kraft nicht beschädigt werden	
16	19.12.2012	F	Die statische Vorspannkraft soll während des Experiments konstant bleiben ($F_{\text{stat}} = 4240$ N)	23.01.2013
Werkstoff				
17	19.12.2012	F	Das Material des Antriebes soll hohe Dauerfestigkeitseigenschaften aufweisen	
18	19.12.2012	F	Möglichst hohe Resistenz gegen Strahlung, chemische, mechanische und thermische Belastung soll gegeben sein	
Steuerung				
19	19.12.2012	W2	Die Steuerung soll an die bestehende Experimentinfrastruktur anpassbar sein (BNC –Connector, RS232, Ethernet)	
20	19.12.2012	F	Die Ansteuerung soll über einen Frequenzgenerator Agilent 33500B erfolgen (Sinus-, rechteck-, dreieckförmiger Verlauf)	
Sicherheit				
21	19.12.2012	F	Das Produkt soll den allgemeinen Unfall- und Sicherheitsrichtlinien gerecht sein	
22	19.12.2012	W2	Angaben des Herstellers bei Montage sind zu beachten	
Legende: F = Forderung, W3 = Sehr wichtig, W2 = wichtig, W1 = Interessant / wenn möglich				

Tabelle 3.2: Anforderungsliste: Blatt 2 von 3

23			Kontrolle	
24	19.12.2012	W3	Sensoren zur Überwachung der Temperatur (Temperaturbereich bis $\vartheta=800^{\circ}\text{C}$)	
25	19.12.2012	W1	Videoüberwachung des Experiments	
26	19.12.2012	W2	Sichtkontrolle vom angewiesenen Personal vor und nach dem Experiment	
			Fertigung	
27	19.12.2012	W3	Fertigung betriebsintern (HASYLAB-Werkstatt)	
28	19.12.2012	W3	Verwendung von Norm- und Fertigteilen	
29	19.12.2012	W2	Fertigungsgerechtes Design	
			Montage	
30	19.12.2012	W3	Die Montage ist nach der Anleitung durchzuführen	
31	19.12.2012	W2	Montage erfolgt vom Beamline-Personal, externen Nutzern mit speziellen Kenntnissen	
			Instandhaltung	
32	19.12.2012	W3	Der Aufbau soll wartungsfrei sein (mind. ½ Jahr)	
33	19.12.2012	W3	Mindeststandzeit von 5 Jahren soll gegeben sein	
			Kosten und Termin	
34	19.12.2012	W3	Die Fertigstellung soll am 13.03.2013 sein	
35	26.02.2013	W3	Budget von 20'000 € soll nicht überschritten werden	
Legende: F = Forderung, W3 = Sehr wichtig, W2 = wichtig, W1 = Interessant / wenn möglich				

Tabelle 3.3: Anforderungsliste: Blatt 3 von 3

4 Konzipieren

Während der zweiten Konstruktionsphase, dem Konzipieren, ist eine Lösungsvariante zu finden, die den festgelegten, präzisierten Zielen des Projektes entspricht. Im Laufe

der Arbeit werden mehrere Ideen zur Realisierung der einen oder anderen Funktion in Betracht gezogen. Im ersten Moment ist es schwer zu entscheiden, welche Lösung im gegebenen Fall die Beste ist. Die Verwendung von methodischen Hilfsmitteln hilft bei dem Vorhaben außerordentlich und erhöht die Chance auf Erfolg der Konstruktion. Die nachstehende Arbeit wird in folgenden Schritten durchgeführt:

- Spalten der Gesamtfunktion in die Teilfunktionen, Funktionsstruktur aufstellen
- Für die Teilfunktionen geeignete Wirkprinzipien aufsuchen und durch die Kombination zur Lösungsvariante zusammenführen
- Die Lösungsvariante als realisierbare Konzepte skizzieren
- Auswahl der besten Lösungsvariante durch Bewertung
- Festlegen des Konzeptes für den Entwurf [4]

4.1 Funktionsstruktur

Zum Abstrahieren der wesentlichen Funktionen und Aufstellung der Funktionsstruktur wird die Black-Box Methode angewendet. Die Gesamtfunktion des Produktes wird als Energie-, Stoff-, Signal- bzw. Informationsfluss durch Eingangs- und Ausgangsgrößen beschrieben. Die Funktionsstruktur wird anhand der Anforderungsliste und abstrakten Aufgabenformulierung erarbeitet.

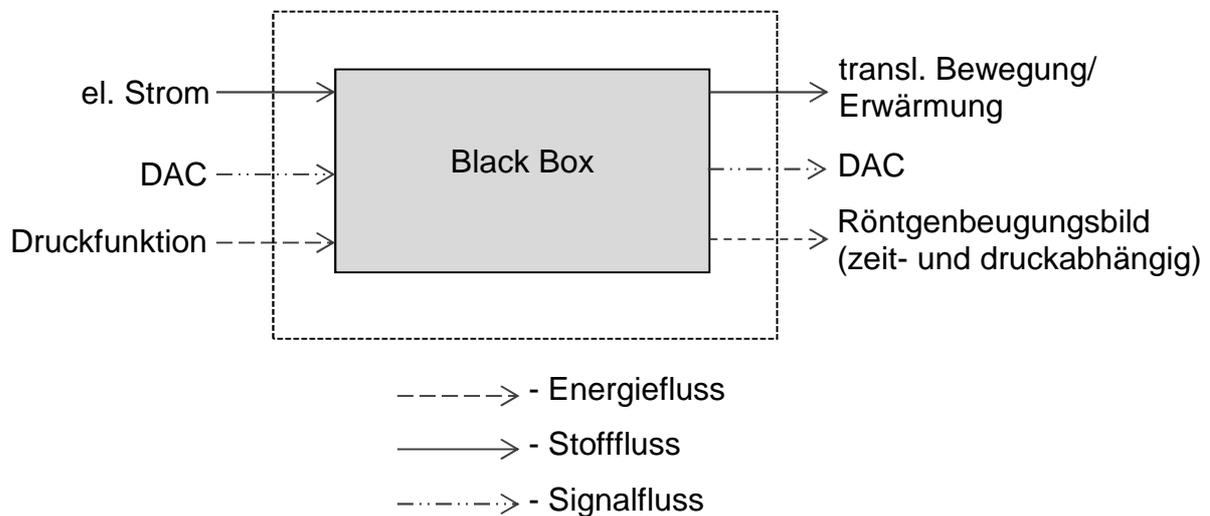


Abbildung 4.1: Gesamtfunktion als Black-Box

Betrachtet man die Black-Box-Darstellung auf der Abbildung 4.1 lässt sich das zu entwickelnde Produkt als ein Gerät vorstellen, welches mit Kombination mit DAC, die elektrische Energie in eine translatorische Bewegung und Erwärmung umwandelt. Als Infor-

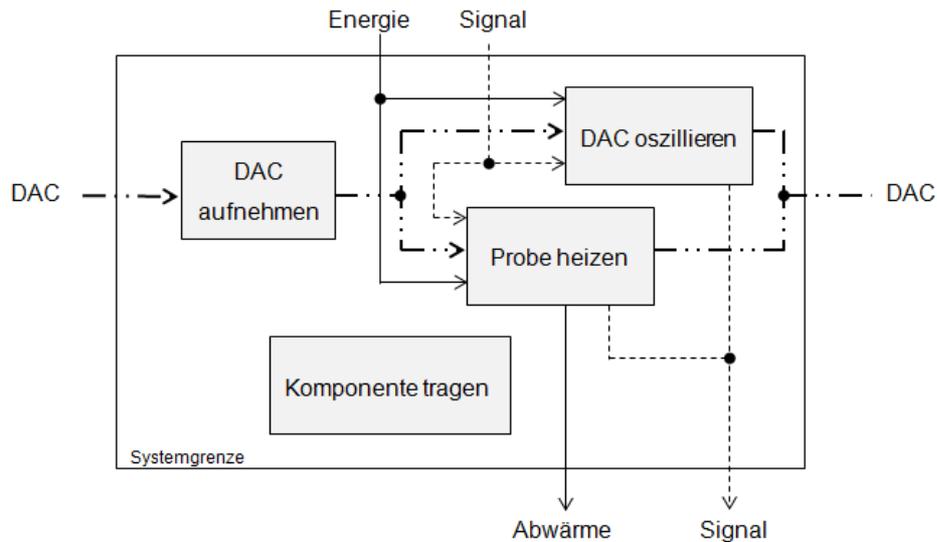


Abbildung 4.2: Funktionsstruktur 1. Ebene

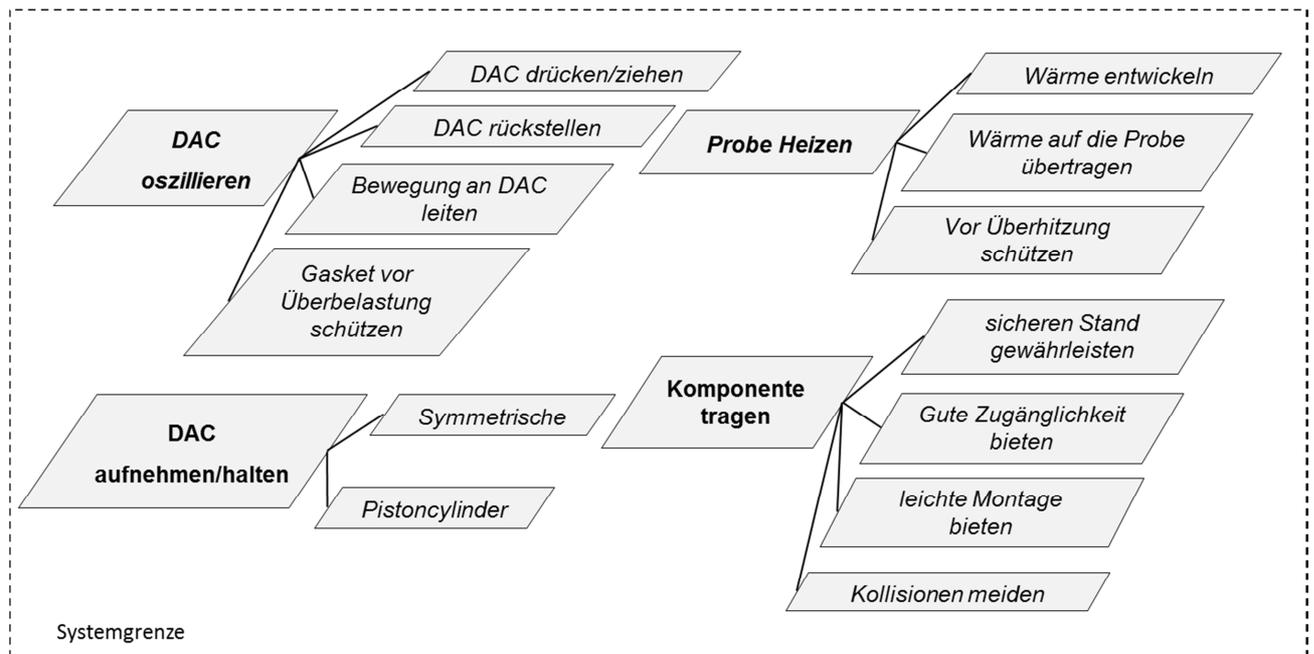


Abbildung 4.3: Funktionsstruktur 2. Ebene

mationsumsatz wird aus definierter Druckfunktion ein Signal in Form von sichtbarem Licht oder spezifischen Beugungsmuster des Röntgenstrahls generiert.

Weitere Aufspaltung der Gesamtfunktion der dDAC ist in den Abbildung 4.2 und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aufgezeigt. Diese Darstellung verdeutlicht die Funktionsweise des neuen Produktes und zeigt die inneren Beziehungen der einzelnen Hauptfunktionen. Das Aufstellen der Funktionsstruktur hilft dem Konstrukteur alle wesentlichen Teilaufgaben zu berücksichtigen und die beste Lösung für die Ideenumsetzung zu finden.

Zusammengefasst wird die Konstruktion in vier Komponenten unterteilt, die folgende Funktionen übernehmen:

1. die Diamantstempelzelle aufnehmen und positionieren
2. oszillierende Bewegung ausführen
3. Probe heizen
4. Gesamtaufbau tragen

Für diesen Fall wird die modulare Bauweise des Produktes als sehr geeignet angesehen. Die Hauptfunktionen werden von den vier Baugruppen/Modulen separat übernommen, was die Fertigung, Konstruktion und ggf. spätere Optimierung positiv beeinflusst. In dieser Arbeit werden mehrere Lösungsvarianten vorgestellt. Gefertigt wird aber nur eine Variante. Die Gegenüberstellung von mehreren möglichen Lösungen soll als Entscheidungshilfe bei der Findung der besten Lösung dienen und ggf. weitere Ideen und Erkenntnisse auslösen.

4.2 Systematische Entwicklung von Lösungsansätzen

Die Richtung der Entwicklung des neuen Produktes wird unumstritten durch die existierende dDAC¹ vorgegeben. Man ist angehalten die bestehenden, funktionierenden Lösungen zu verwenden, denn dadurch werden die Risiken bei der Entwicklung des neuen Produktes gemindert. Trotzdem wird die Methode des morphologischen Kastens für das Konzipieren hinsichtlich besserer Kreativität als sehr nützlich angesehen. Nach dem Erstellen der Funktionsstruktur und Ermittlung der Teilfunktionen des Systems, werden die Wirkprinzipien gefunden, mit denen die Umsetzung einzelner Teilfunktionen möglich wird. Anschließend werden die Wirkprinzipien in einer tabellarischen Form den Teilfunktionen zugeordnet. Auf diese Weise erhält man einen guten Überblick über die Aspekte „Was soll gemacht werden?“ und „Wie/Wodurch soll es realisiert werden?“. Diese Betrachtung hilft sowohl bei der Kombination von mehreren, unterschiedlichen Gesamtlösungsvarianten als auch bei dem Vergleich und der Bewertung der erstellten Varianten. Die Kombination der Teillösungen geschieht durch das Verbinden von Teillösungen zu einer Gesamtlösung (eine Teillösung je Teilfunktion). Abgesehen davon, dass für die Teilfunktion „Oszillieren der dDAC“ von vorn heraus die Verwendung der Technologie der Piezostapelelemente als vorteilhaft angesehen wird, werden bei dem morphologischen Kasten auch andere Technologien in Betracht gezogen um die Kreativität nicht zu beschränken und die Anregung zu weiteren Ideen zu fordern.

¹ William J. Evans (Evans u.a. 2007, Lawrence Livermore National Laboratory)

Der morphologische Kasten ist in der Tabelle 4.1 dargestellt. Die Auswertung liefert drei Gesamtlösungen, die im Folgenden genauer beschrieben werden. Tatsächlich bietet die Vielfalt von Teilfunktionen und -lösungen eine viel höhere Anzahl von möglichen Lösungsvarianten. Die Bewertung aller dieser Varianten würde den Aufwand deutlich steigern. Es ist wichtig bei dem Zusammenstellen der Lösung auf die Kompatibilität der Komponenten zu achten und auch darauf, welche Vor- und Nachteile durch die Kombination der gegebenen Teillösungen in die Gesamtlösung miteinfließen könnten. Durch diese systematische, zielgerichtete Vorgehensweise werden nur die Lösungen von hoher Effizienz und hohem Nutzen, in diesem Fall drei, in Betracht gezogen und bewertet.

4.2.1 Lösungsvariante 1

Die erste Lösungsvariante beschreibt weitgehend die existierende Vorrichtung der LLNL-Wissenschaftler. Das wesentliche Unterscheidungsmerkmal der verwendeten Diamantstempelzelle „Pistonzylinder“ gegenüber der „Symmetrische“ ist das Vorhandensein des Gewindes an der Mantelfläche. Dieses ermöglicht eine Schraubenverbindung der DAC mit dem Gehäuse der Vorrichtung. In der Abbildung 4.2 ist das Foto von der o.g. Vorrichtung zu sehen. Auf dem Bild sind unter anderem die drei Piezo-Aktoren werden durch die Kraft der Tellerfeder der DAC erzeugt. Getrennt durch eine thermisch isolierende Platte wirken die Aktoren faktisch direkt auf die DAC (die Elastizität der Platte ist zu vernachlässigen). Um die Schäden an Diamanten und an der Gasket zu verhindern, sind die Parameter der Ansteuerung so zu wählen, dass der maximal zulässige Druck nicht überschritten wird. Die Druckmessung in der Probenkammer wird anhand der Ru-



Abbildung 4.2: dDAC (Ausführung stauchend)

zu erkennen, die die Funktion „Oszillieren der DAC“ ausführen. Die Rückstellkräfte binfluoreszenz ausgeführt¹ (setzt das Vorhandensein der Rubinsteine in der Probenkammer voraus). Das Heizen der Probe geschieht mit Hilfe einer in Keramik eingegossenen, ringförmigen Glühwendel. Platziert um die Anvils, erwärmt die Glühwendel durch die freie Konvektion die Probe und ermöglicht einen lokalen Temperaturanstieg bis ca. 500°C. Während des Experiments kann die Temperatur im Bereich der Piezoelemente

¹ Das Fluoreszenz-Signal eines mit Chrom dotierten Al_2O_3 ist Druckabhängig

an der Temperaturanzeige abgelesen werden, wird ein Wert von ca. 100°C überschritten, muss das Experiment angehalten werden, um die Thermische Belastung der PE-Aktoren zu reduzieren. Die Vorrichtung wird mit einer Klemme an der vorgesehenen Positionierplatte M-BKL 4 der Firma Newport befestigt und ermöglicht dadurch eine leichte Montage am Probenstisch der Experimentierhütte. Die kompakte Bauweise bietet dem Benutzer die Möglichkeit einer Nachjustierung ohne, dass die Apparatur demonstriert werden muss.

4.2.1 Lösungsvariante 2

Bei der zweiten Lösungsvariante wird die DAC durch eine Schraubenverbindung am Träger/Gehäuse befestigt. Zum Antreiben wird ein Elektromotor mit dem Nocken verwendet. Die Rückstellung in die Ausgangslage erfolgt durch die Kräfte der Tellerfeder der DAC. Die Übertragung der Kräfte von dem Aktor zur DAC geschieht genauso, wie bei der Lösungsvariante 1. Durch die Madenschrauben kann der Hub der DAC begrenzt und die Deformation der Gasket verhindert werden. Als Heizungsquelle werden die Heizelemente aus Aluminiumnitrid-Keramik, ein Produkt der Firma Watlow's ULTRA-MIC, verwendet, die die Probe durch die freie Konvektion auf die gewünschte Temperatur bringen. Durch den Temperaturbegrenzer wird das Überschreiten der kritischen Temperatur verhindert. Das Gehäuse des Produktes wird über ein Stellfuß auf der Positionierplatte montiert.

4.2.1 Lösungsvariante 3

Die kraftschlüssige Verbindung durch eine Klemme soll die Aufnahme der Stempelzelle bei dem dritten Lösungskonzept realisieren. Die Oszillation der DAC erfolgt durch die Wechselwirkung der Kräfte von Piezoelemente und externen Tellerfeder. Die Übertragung der Kräfte wird zwecks platzsparender Anordnung geschieht indirekt über eine Scheibe. Die Überwachung des Kammerdruckes liefert die Stellparameter für die Steuerung der elektromechanischen Elemente und verhindert dadurch die übermäßige Belastung der Apparatur. Die Probe wird durch die Thermoelemente der Firma OMEGA Engineering, Inc. auf die gewünschte Temperatur gebracht. Die Wärmeübertragung soll dabei durch die Wärmeleitung erfolgen. Die vorgesehene Umlaufrückführung sorgt für den Schutz gegen thermische Überlastung der Piezoelemente im Dauerbetrieb. Die Lagerung der Vorrichtung geschieht auf die gleiche Art, wie bei den beiden anderen Lösungsvarianten.

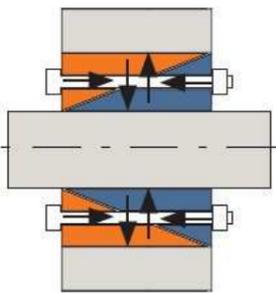
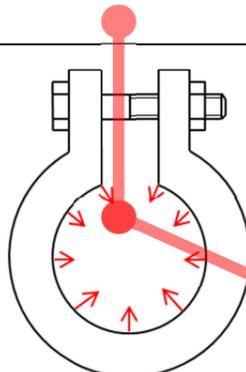
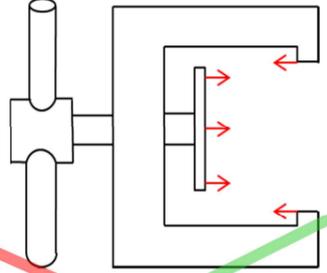
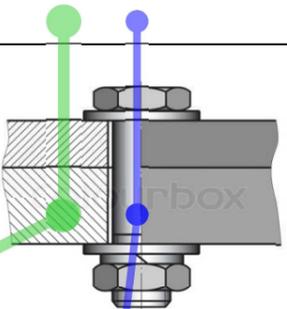
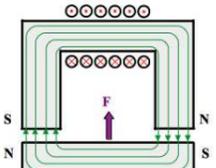
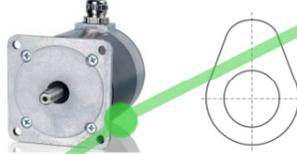
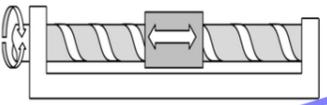
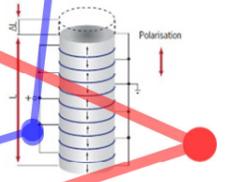
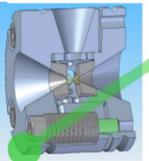
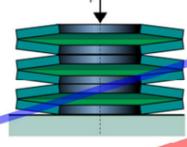
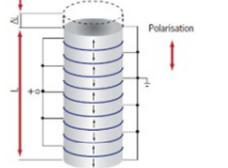
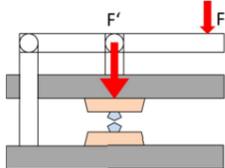
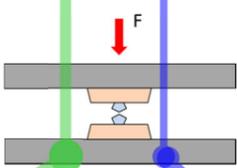
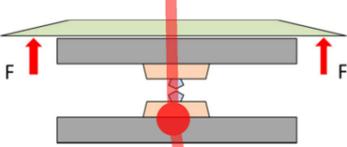
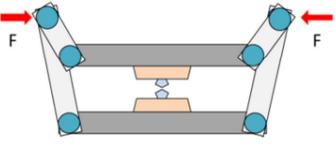
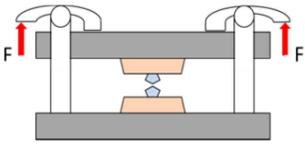
Teilfunktion						
DAC aufnehmen	DAC Lagern (universell)	 Dreipunktaufnahme	 Spannsatz	 Klemmung durch radiale Kräfte	 Klemmung durch axiale Kräfte	 Schraubenverbindung
		 Elektromagnet	 Hydraulik Zylinder/Membran	 Elektromotor mit Exzenter/Nocken	 Spindelantrieb	 Piezostapel-Element
DAC oszillieren	DAC drücken/ziehen	 Schraubenfeder	 Tellerfeder der DAC	 Externe Tellerfeder	 Piezostapel-Element	
	DAC rückstellen	 Schlepphebel	 Direkt	 über Druckplatte	 Zwei-Hebel-Mechanik	 Kipphebel
	Gasket vor Überlastung schützen	 Maderschrauben der DAC	 externe Anschlagsschraube	 durch elektronische Steuerung		

Tabelle 4.1: Morphologischer Kasten: Blatt 1 von 2

LV2

LV1

LV3

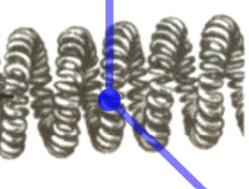
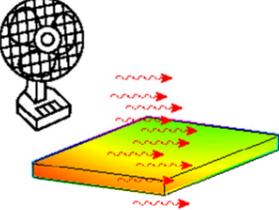
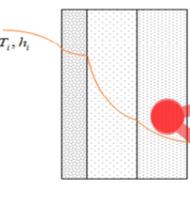
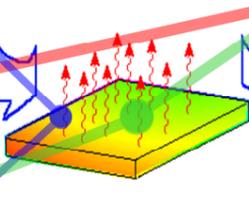
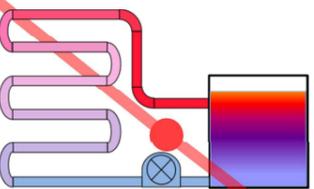
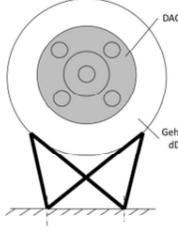
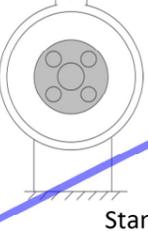
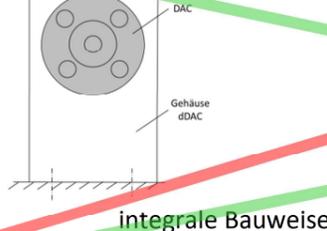
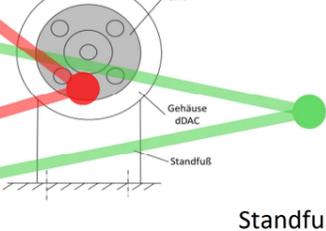
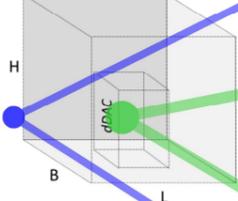
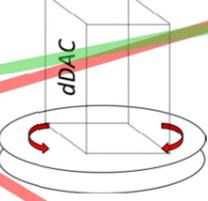
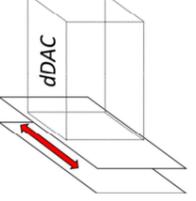
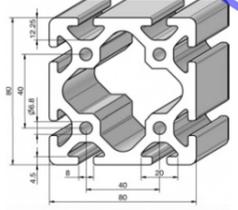
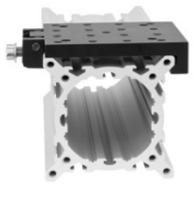
Probe heizen	Wärme entwickeln	 Wendelrohrpatrone	 Glühwendel	 Keramikheizpatrone	 AlN Ceramic Heater	 Heizelement aus Platindraht
	Wärme übertragen	 erzwungene Konvektion	 Wärmeleitung	 freie Konvektion	 Strahlung	
	Aktoren vor Überhitzung schützen	 Temperaturbegrenzer	 Temperaturmelder	 Umlaufkühlung	 Luftkühlung	
Komponente tragen	sicheren Stand gewährleisten	 Rahmen	 Standfuß mit Klemme	 integrale Bauweise	 Standfuß	
	gute Zugänglichkeit für Justage bieten	 kompakter Aufbau	 drehbare Platte	 ausfahrbare Plattform		
	leichte Montage bieten	 Rose Krieger Profilsystem	 Positionierplatte Newport M-BKL-4	 Montageplatte Thorlabs		

Tabelle 4.2: Morphologischer Kasten Blatt 2 von 2

LV1 LV2 LV3

4.3 Bewertung der Lösungsansätze

Die entstandenen Lösungsvarianten sind mit einem Bewertungsverfahren zu untersuchen. Dieses ermöglicht das Feststellen des bestmöglichen Konzepts für den Entwurf. Für die Bewertung werden zunächst die Bewertungskriterien sinngemäß den Forderungen der Anforderungsliste bestimmt. In einer Tabelle werden die Bewertungskriterien paarweise verglichen, dabei wird die Kriterium vom höheren Interesse mit einer „1“ und vom geringeren Interesse entsprechend mit einer „0“ versehen. Die sogenannte Dominanzmatrix¹ ist der Tabelle 4.3 zu entnehmen.

Dominanzmatrix																
	hohes Auflösungsvermögen	kurze Reaktionszeit	hohe Frequenz	hohe Krafterzeugung	Variabilität der Steuerung	geringer Bauraum	geringe Masse	leichte Handhabung	hohe Lebensdauer	gute Wirtschaftlichkeit	leichte Montage	geringer Fertigungsaufwand	hohe Reproduzierbarkeit	Summe der Punkte	Gewichtungsfaktor g	Rang
hohes Auflösungsvermögen	X	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	9	0,115	3
kurze Reaktionszeit	0	X	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	6	0,077	6
hohe Frequenz	0	0	X	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	3	0,038	10
hohe Krafterzeugung	0	1	1	X	0	0	1	1	1	0	0	1	0	6	0,077	6
Variabilität der Steuerung	1	1	1	1	X	1	1	1	0	1	1	1	1	11	0,141	1
geringer Bauraum	0	0	1	1	0	X	1	0	0	1	0	1	0	5	0,064	9
geringe Masse	0	0	0	0	0	0	X	0	0	1	0	1	0	2	0,026	12
leichte Handhabung	1	1	1	0	0	1	1	X	0	1	1	1	0	8	0,103	4
hohe Lebensdauer	0	0	0	0	1	1	1	1	X	1	0	1	0	6	0,077	6
gute Wirtschaftlichkeit	0	0	0	1	0	0	0	0	0	X	0	0	0	1	0,013	13
leichte Montage	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	X	1	0	8	0,103	4
geringer Fertigungsaufwand	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	X	0	3	0,038	10
hohe Reproduzierbarkeit	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	X	10	0,128	2
Gesamt														78	1	

Tabelle 4.3: Dominanzmatrix

Teilt man die Summe der Punkte je Variante durch die Gesamtzahl erhält man die *Gewichtungsfaktoren g*. Nach der Vergabe des Ranges ist erkennbar, welche Kriterien von hoher Bedeutung für die Konstruktion sind und welche nicht. Im gegebenen Fall nimmt die Variabilität der Steuerung die erste und die Wirtschaftlichkeit die letzte Stelle in der

¹ Dominanztabelle (nach Pahl/Beiz) – Bewertungsverfahren der VDI 2225 Richtlinie

Rangliste. Folgende Verhaltensweise ist nachvollziehbar, da es in dieser Arbeit um eine Einzelanfertigung für die betriebsinterne Zwecke handelt.

Die Punktbewertung nach VDI 2225 Richtlinie erfolgt mit vergabe der Punkte von 0 - unbefriedigend bis 4 - sehr gut. Die Punkte der Werteskala werden je nach Vorstellung des Konstrukteurs den Kriterien des jeweiligen Lösungskonzepts zugewiesen. Die Vergabe von den extremen Punkten 0 und 4 sollte nur bei extremen Eigenschaften erfolgen¹. Die Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien werden mit den Punkten multipliziert, die Produkte $P \cdot g$ werden für die Bewertung addiert und in der Bewertungsliste (Tabelle 4.4) eingetragen.

		Bewertungsliste				Blatt Nr. 1 von 1		
Bewertung der Gesamtlösungskonzepte								
Werteskala nach VDI 2225 mit Punktevergabe P von 0 bis 4: 0 = unbefriedigend, 1 = gerade noch tragbar, 2 = ausreichend, 3 = gut, 4 = sehr gut								
Konzeptvarianten			LV1		LV2		LV3	
Nr.	Bewertungskriterien	g	P	P*g	P	P*g	P	P*g
1	hohes Auflösungsvermögen	0,115	4	0,4615	2	0,2308	4	0,462
2	kurze Reaktionszeit	0,077	2	0,1538	2	0,1538	4	0,308
3	hohe Frequenz	0,038	2	0,0769	3	0,1154	3	0,115
4	hohe Krafterzeugung	0,077	3	0,2308	3	0,2308	3	0,231
5	Variabilität der Steuerung	0,141	4	0,5641	2	0,2821	4	0,564
6	geringer Bauraum	0,064	2	0,1282	2	0,1282	3	0,192
7	geringe Masse	0,026	2	0,0513	2	0,0513	2	0,051
8	leichte Handhabung	0,103	3	0,3077	3	0,3077	3	0,308
9	hohe Lebensdauer	0,077	3	0,2308	3	0,2308	3	0,231
10	gute Wirtschaftlichkeit	0,013	1	0,0128	4	0,0513	2	0,026
11	leichte Montage	0,103	3	0,3077	3	0,3077	2	0,205
12	geringer Fertigungsaufwand	0,038	3	0,1154	3	0,1154	2	0,077
13	hohe Reproduzierbarkeit	0,128	3	0,3846	2	0,2564	3	0,385
Maximale Punktzahl P_{max}		Σ		3,0256		2,4615		3,154
Technische Wertigkeit W_t				0,6731		0,6538		0,731
Rangfolge				2		3		1
Datum: 27.02.2013					Bearbeiter: Eugen Wittich			

Tabelle 4.4: Bewertungsliste nach VDI 2225

¹ „Grundlagen der Konstruktionslehre“, Klaus-Jörg Conrad, Carl Hanser Verlag München Wien

Das Ergebnis des Bewertungsverfahrens ergibt, dass die Lösungsvariante 3 mit der Punktzahl von 3,174 das beste Konzept für die Ausarbeitung ist. Es ist zu erwähnen, dass die erste Lösungsvariante mit der Punktzahl knapp unterhalb dem Tabellenführer eine starke Konkurrenz darstellt. Sollte die Entwicklung der dynamischen Diamantstempelzelle fortschreiten, ist es empfehlenswert diese Variante nochmals in Betracht zu ziehen. Im gegebenen Fall, dient die Lösungsvariante 3 als Favorit für die bevorstehende Ausarbeitung des Entwurfs.

5 Entwerfen

Das Lösungskonzept liefert die grundlegenden Informationen bezüglich der Funktionsweise des Produktes, die Anordnung der Komponente und deren Zusammenhang. Unter Berufung auf das festgelegte Konzept, lässt sich eine Prinzipskizze anfertigen. Die Abbildung 5.1 stellt die wesentlichen Merkmale dar, die bei der Phase „Konzipieren“ erarbeitet wurden und bei dem Entwerfen berücksichtigt werden müssen.

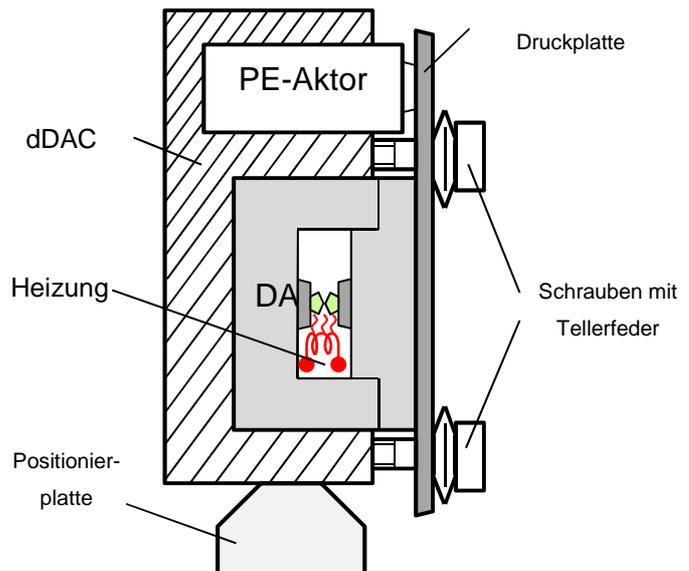


Abbildung 5.1: Entwurfsskizze

Die zentrale Aufgabe der dynamischen DAC ist die Schwingungsanregung der Probe mit Hilfe von elektromechanischen Aktoren, in dem Fall Piezostapel-Elemente. Die Verwendung von Piezotechnologie für den Antrieb spielt eine große Rolle in der Entwurfsphase. Somit werden zunächst die Voraussetzungen berücksichtigt, die den zuverlässigen Betrieb der Konstruktion mit Piezoelementen sicherstellt.

5.1 Auslegung der Piezostapelaktoren

5.1.1 Grundlagen

Piezostapelelemente sind die elektromechanische Aktoren die axiale Druckkräfte bzw. Verschiebungen realisieren. Als ein Stapel von mehreren Schichten aus Piezokeramik, elektrisch verbunden mit Hilfe von speziellen Zwischenelektroden kann ein herkömmlicher Piezostapelelement eine Auslenkung von einigen zehntel Millimeter erreichen und

dabei die Kräfte von mehreren Tausend Newton aufbringen. Die Verwendung findet vom statischen bis hin zum hochdynamischen Betrieb statt. Hohe Präzision, kurze Reaktionszeiten und hohes Auflösungsvermögen zählen ebenfalls zu den Stärken der Piezo-Technologie, die die Anforderungen an das neue Produkt sicher erfüllen können. Es ist zu berücksichtigen, dass das Auftreten der Schub-, Biege- oder Torsionsspannungen in der Piezo-Keramik zum Ausfall des Aktors führen können. Die Konstruktion sollte so ausgelegt werden, dass nur reine Druckbelastung auf die Aktoren ausgeübt wird. Bei dem dynamischen Betrieb weit unterhalb der Resonanzfrequenz weisen die Aktoren die elektrischen Eigenschaften eines Kondensators auf und es ist mit den Verlusten in Form von Wärme zu rechnen, die den Einsatz benachteiligen. Die zu hohe Temperatur setzt die maximale Auslenkung herab und erhöht die Kapazität des Aktors. Für einen zuverlässigen Dauerbetrieb ist für die ausreichende Kühlung der Aktoren zu sorgen. Neben den genannten Schwerpunkten sind bei der Auswahl von Piezostapelelementen die Daten folgender Parameter zu beachten:

- Stellweg, Hübe
- Kraftentwicklung
- dynamische Kraftmodulation
- Bauraum der Konstruktion

5.1.2 Kräfte und Wege

Die maximale Auslenkung und damit verbundene Kraftentwicklung wird in dieser Anwendung weitestgehend von den Eigenschaften der Diamantstempelzelle bestimmt. Betrachten wir zunächst den inneren Aufbau der Zelle auf der Abbildung 5.2.

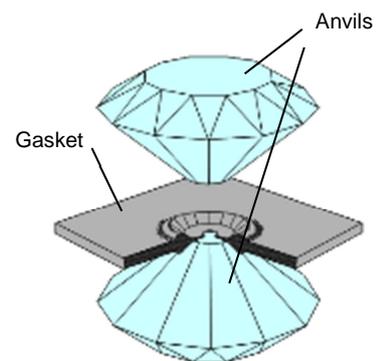


Abbildung 5.2: Diamantstempelzelle von innen
(Quelle: <http://www.mawi.tu-darmstadt.de>)

Berufen auf die Arbeit von William J. Evans, wird die Volumenänderung der Kammer und damit verursachte Änderung des Druckes hauptsächlich durch die mechanischen Eigenschaften der metallischen Dichtung –das Gasket, begrenzt. Stellt man sich die Kammer als einen Zylinder vor und setzt die Aufrechterhaltung des konstanten Querschnittes voraus, kann folgender Zusammenhang hergestellt werden:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta l \cdot A}{l \cdot A} = \frac{\Delta l}{l}$$

wobei V – Volumen der Kammer, l – die Höhe, A – der Querschnitt, Δl – die Höhenänderung und ΔV – die Druckänderung stehen. Die metallische Dichtung zwischen den

beiden Diamantstempeln wird während des Betriebes einer wechselnden Druckbelastung ausgesetzt. Dabei ist es wichtig, dass die Verformung der Gasket nur im elastischen Bereich stattfindet. Wird die Streckgrenze der Gasket überschritten, verformt sich das Material plastisch und die Messung liefert kein eindeutiges, nachvollziehbares Ergebnis. Als Gasket wird in der Regel wegen seiner hohen Festigkeit ein Blech aus Rhenium verwendet. Die Dicke des Bleches beträgt $20 \dots 40 \mu\text{m}$. Ausgehend von der o. g. Beziehung und den mechanischen Eigenschaften von Rhenium-Gasket (E-Modul $E = 430 \text{ GPa}$, Streckgrenze $R_e = 1800 \text{ MPa}$)¹ kann die maximale Höhenänderung Δl wie folgt bestimmt werden:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}; \quad \varepsilon_{el} = \frac{R_e}{E}; \quad \Delta l = \frac{R_e}{E} \cdot l;$$

die elastische Dehnung des Rheniums $\varepsilon_{el} = 0,04\%$ und die Gasketdicke $l = 40 \mu\text{m}$ ergibt die maximale Auslenkung

$$\Delta l = \frac{1800 \text{ MPa}}{430 \text{ GPa}} \cdot 40 \mu\text{m} = \mathbf{0,16 \mu\text{m}}$$

Die Eigenschaften der gängigen Piezostapelelemente können diese Stellwege zweifellos realisieren. Wichtig dabei ist es die Weg-Verluste in den mechanischen Komponenten zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wird als Auswahlkriterium an den Antrieb der dDAC eine Hubbewegung $\Delta l = 10 \mu\text{m}$ vorausgesetzt.

Die im dynamischen Betrieb auftretenden Kräfte hängen vor allem mit der Steifigkeit der Diamantstempelzelle, mit der bewegten Masse und deren Beschleunigung zusammen.

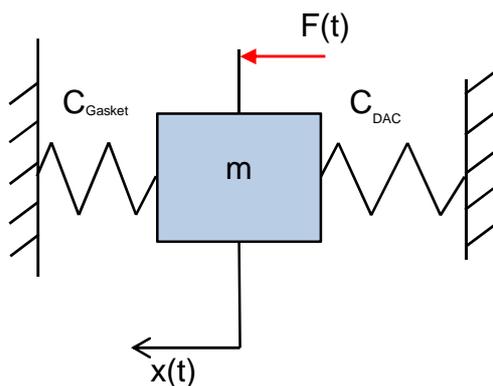


Abbildung 5.3: DAC als Feder-Masse-System

In Abbildung 5.3 ist das Schwingmodell der DAC dargestellt. Die Tellerfedern, die Gasket und die bewegliche Hälfte des Gehäuses bilden ein schwingfähiges Feder-Masse-System, dessen Parameter zunächst zu bestimmen sind.

Eine Gehäusehälfte der DAC und die Druckscheibe (Entwurf) werden mit der periodischen Kraftfunktion zum Schwingen um die Ruhelage gebracht. Das Gasket und die Tellerfedern

werden als zwei in Reihe angeordnete Federn betrachtet, deren Steifigkeiten, zusam-

¹ Angaben für Materialkennwerte aus: "Dynamic diamond anvil cell (dDAC): A novel device for studying the dynamic-pressure properties of materials" William J. Evans, Choong-Shik Yoo, Geun Woo Lee, Hyunchoe Cynn, Magnus J. Lipp et al.

men mit der bewegten Masse, die wesentlichen Parameter der Schwingung beeinflussen. Die Steifigkeit der Materialprobe wird in diesem Modell aufgrund von Größenverhältnis vernachlässigt. Zur Ermittlung der Steifigkeit c_{Gasket} wird die Metaldichtung als ein Druckstab aus einem Rohrprofil angesehen, dessen Steifigkeit wie folgt berechnet werden kann:

$$c = \frac{A \cdot E}{l}$$

wobei A – die Querschnittsfläche, E – Der Elastizitätsmodul und l – die Dicke der Dichtung sind. Laut Angaben des wissenschaftlichen Leiters der Extreme Conditions Beamline, Dr. Hans-Peter Liermann, werden bei Experimenten mit DAC die Diamanten mit den Cullet-Durchmessern von 0,1 bis 0,4 mm verwendet. Der optimale Durchmesser für die Bohrung beträgt nach Faustformel von 1/3 bis 1/2 des Cullet-Durchmessers. [3] Mit diesen Eckdaten und den Eingeschalten von Rhenium bekommt man für die Steifigkeit der Gasket einen Wert von ca. 550 ... 700 N/μm. Als einen Anhaltspunkt für die weitere Vorgehensweise wird der Wert $c_{Gasket} = 600 \text{ N}/\mu\text{m}$ angenommen.

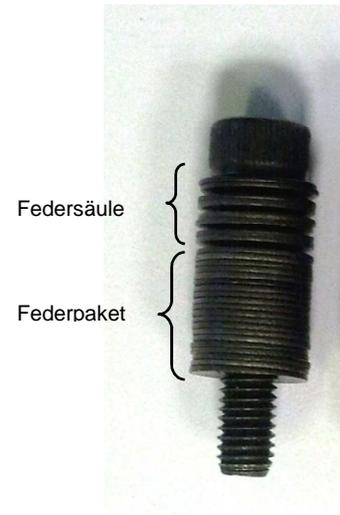


Abbildung 5.4: DAC-Schraube mit Tellerfedern



Abbildung 5.5: Steifigkeitsmessung; die Messuhr zeigt die Auslenkung infolge von Last

Die Steifigkeit der Tellerfeder c_{DAC} wurde direkt an der DAC gemessen. Dazu wurden die Schrauben der DAC mit den gleichen Tellerfederkombinationen versehen und handfest angezogen. Auf der Abbildung 5.4 ist die Tellerfederkombination mit Federpaket aus 20 und Federsäule aus 10 Einzelfedern dargestellt, die für die Messung vorbereitet wurde. Für die Messung wurde linearer Federkraftverlauf angenommen. Die Diamantstempelzelle wurde mit Bleiziegel-Gewichten belastet und die Auslenkung mit Hilfe der Messuhr gemessen. Anschließend wurden die Messwerte mit einer Tabellenkalkulationssoftware ausgewertet.

Bestimmung der Steifigkeit der Tellerfeder				
Gewichte	Einzelgewicht	Masse [kg]	Kraft [N]	Auslenkung[mm]
0	0	0,00	0,00	0
1	5,55	5,55	54,45	0,054
2	5,35	10,90	106,93	0,1
3	5,5	16,40	160,88	0,149
4	5,6	22,00	215,82	0,182
5	5,45	27,45	269,28	0,219
6	5,5	32,95	323,24	0,231
7	5,6	38,55	378,18	0,283
8	5,6	44,15	433,11	0,334
9	5,7	49,85	489,03	0,371
10	5,7	55,55	544,95	0,394

Tabelle 5.1: Messwerte für Auslenkung und Federkraft

Die Tabelle 5.1 liefert die Werte für gemessene Federkraft und die Auslenkung der DAC.

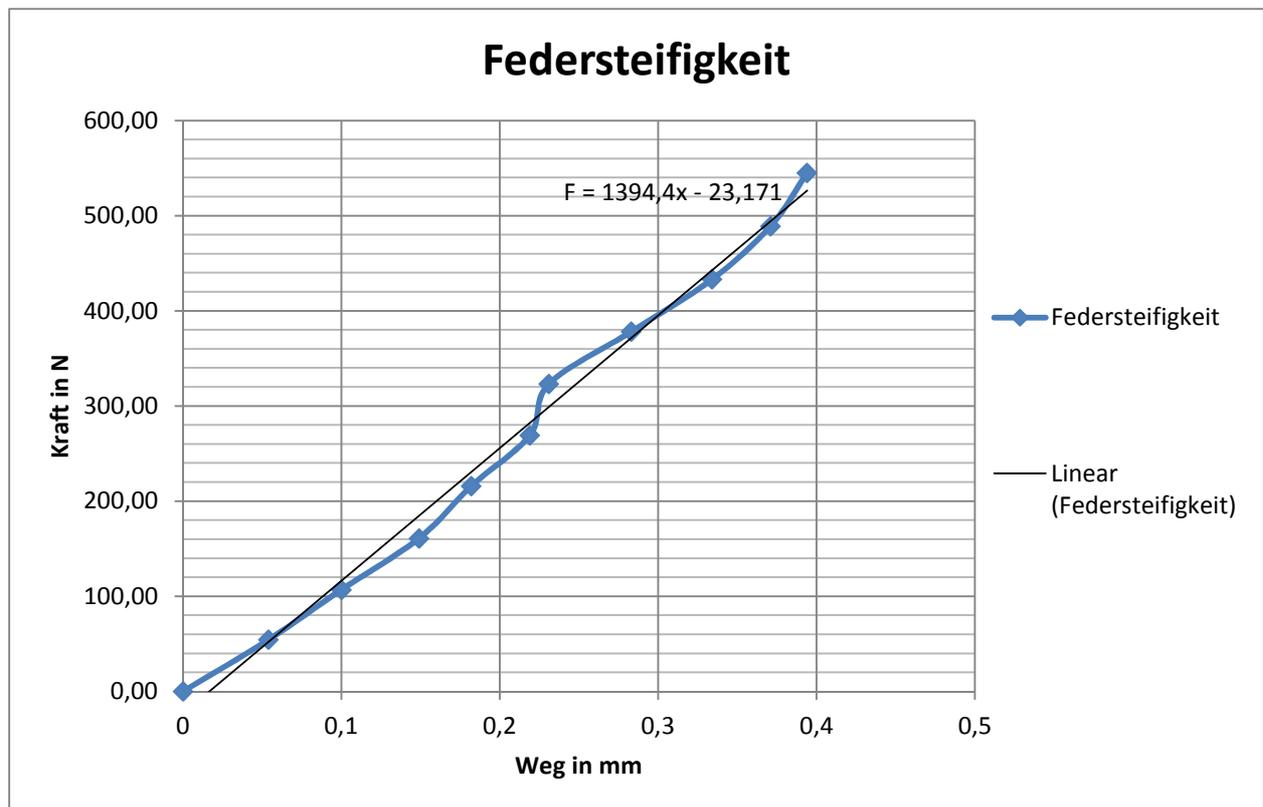


Diagramm 5.1: Lineare Verlauf der Federkraft

Im Diagramm 5.1 ist der Verlauf der gemessenen Federkraft über die Auslenkung der DAC gezeigt. Die Anordnung der Messwerte bildet weitestgehend eine Gerade, was die Annahme der Linearität bestätigt. Das Anlegen einer Trendgeraden durch die Messpunkte liefert eine Geradengleichung $F = 1394,4 \cdot x - 23,171$, deren Steigung die Gesamtsteifigkeit der Tellerfeder wiedergibt. Somit hat die Steifigkeit c_{DAC} des Masse-Feder-Systems einen Wert von ca. 1400 N/mm oder $1,4 \text{ N}/\mu\text{m}$. Unter der Annahme,

dass alle verbauten Tellerfedern die gleiche Federkonstante c_{TF} aufweisen, kann diese mit folgender Formel berechnet werden:

$$c_{TF} = c_{DAC} \cdot \frac{i+1}{n \cdot k} = 1,4 \frac{N}{\mu m} \cdot \frac{10+1}{20 \cdot 4} = \mathbf{0,2 \frac{N}{\mu m}}$$

wobei die i – , n – Anzahl der Tellerfeder im Federpaket und k – die Anzahl der Schrauben der DAC.

Die Verwendung von verschiedenen Kombinationen von Tellerfedern als Federpaket bzw. Federsäule ermöglicht die Änderung der Steifigkeit und somit auch der dynamischen Eigenschaften der DAC, was später bei der Durchführung der Experimente von Interesse wäre. Die maximale Steifigkeit der DAC wird erreicht, wenn alle Tellerfeder als Federpaket angeordnet werden. In diesem Fall ist die Steifigkeit der DAC mit $n = 30$ und $i = 0$ zu berechnen:

$$c_{DAC} = c_{TF} \cdot \frac{n \cdot k}{i+1} = 0,2 \frac{N}{\mu m} \cdot \frac{30 \cdot 4}{0+1} = \mathbf{24 \frac{N}{\mu m}}$$

Die Gesamtsteifigkeit des Feder-Masse-Systems kann wie folgt berechnet werden:

$$c_{ges} = c_{DAC} + c_{Gasket} = 600 \frac{N}{\mu m} + 24 \frac{N}{\mu m} = \mathbf{624 \frac{N}{\mu m}}$$

Der Produkt aus Gesamtsteifigkeit und dem Stellweg ergibt die statische Kraft zu:

$$\Delta F_{mech} = c_{ges} \cdot \Delta l = 624 \frac{N}{\mu m} \cdot 10 \mu m = \mathbf{6240N}$$

Laut Aussage von William J. Evans, wird die Frequenz der existierenden dDAC auf ca. 100 Hz begrenzt. Dieses Verhalten wird mit den Reibungsverlusten und Trägheit der Konstruktion erklärt. Für die überschlägige Berechnung der dynamischen Kräfte für das neue Produkt wird eine Frequenz mit 200 Hz, die Masse der PE-Aktoren mit 150g und die bewegte Masse mit 340g angenommen. Die im Sinusbetrieb auftretenden dynamischen Kräfte können wie folgt abgeschätzt werden:

$$F_{dyn} = \pm 4 \cdot \pi^2 \cdot m_{eff} \cdot \left(\frac{\Delta l}{2}\right) \cdot f^2 = \pm 4 \cdot \pi^2 \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot 150g + 340g\right) \cdot \left(\frac{10\mu m}{2}\right) \cdot (200Hz)^2 = \mathbf{3N}$$

Mit m_{eff} – Summe der bewegten Masse und 1/3 des Gewichts vom PE-Aktor

Δl – Auslenkung des Aktors (Spitze-Spitze)

f – die Betriebsfrequenz[9].

Aufgrund des geringen Wertes können die dynamischen Kräfte zunächst vernachlässigt werden.

5.1.3 Marktrecherche und Auswahl der PE-Aktoren

Für die ermittelten Angaben wurden mehrere Produkte auf dem Markt gefunden und in der Tabelle 5.2 aufgeführt. Es handelt sich dabei um die Hersteller Piezomechanik GmbH, Physik Instrumente (PI) GmbH & Co.KG und Piezo Jena GmbH. Nach dem Erhalt von verbindlichen Angeboten konnte der Kostenfaktor für die Entscheidung mitberücksichtigt werden.

Tabelle der Piezomotoren (Seite 1 von 3)			
	dDAC W.Evans	1. Variante (Nachfolger)	2. Variante
			
Hersteller	Piezomechanik GmbH		
Modell	PSt 150/20/18 VS25	PSt 150/20/20 VS25	PSt 150/14x14/20
Hub [µm]	25/18*	25/20*	28/20
Kapazität [µF]	11	11	14,5
Auflösung [nm/mV]	0.1	0.1	
Resonanzfrequenz [kHz]	28	28	47
Steifigkeit [N/µm]	500	500	500
Blockierkraft [N]	14000 (Wirkkraft: 11000)	14000 (Wirkkraft: 11000)	15000(max. Belastung 16000)
Vorspannung [N]	1500	1500	0
Spannungsbereich [V]	-30...+150 (0...+150)*	-30...+150 (0...+150)*	-30...+150 (0...+150)*
Abmessungen	Länge L [mm]	38 (mit Endstück)	38 (mit Endstück)
	Diameter D [mm]	25	25
Anwendungen/Merkmale			-Großer Einsatztemperaturbereich -273°C => +120°C(oberhalb 100°C reduzieren sich die Aktoreigenschaften (reversibel) -Zuverlässiger Betrieb durch stressfreie Keramikstruktur -Enge Fertigungstoleranzen des Keramikstapels -statischen und hochdynamischen Anwendungen
Optionen	-Thermostabile Version -Tiefemperaturversion -UHV-Kompatibilität -Positionserfassung	-Thermostabile Version -Tiefemperaturversion -UHV-Kompatibilität -Positionserfassung	-Anpassung an exotische Betriebsbedingungen (UHV, cryo etc.) -Positionssensoren (DMS)
Preis	\$1.154,12	730,00 €	365,00 €

Tabelle 5.2: Produktliste der Piezoelemente (Blatt 1 von 3) [6]

Die Produktliste enthält unter anderem die PE-Aktoren der existierenden Vorrichtung des William J. Evans. So können die Parameter der Produkte leicht verglichen werden.

Tabelle der Piezomotoren (Seite 2 von 3)				
		3. Variante	4. Variante	5. Variante
				
PI Physik Instrumente				
Hersteller		PI Physik Instrumente		
Modell		P-025.10P	P-216.10	P-225.10 (P-025.10P)
Hub [µm]		15	15	15
Kapazität [µF]		320	130	320
Auflösung [nm/mV]		sub-nm Auflösung	0,15 (ungeregelt)	0,15 (ungeregelt)
Resonanzfrequenz [kHz]		58	17	14
Steifigkeit [N/µm]		660	315 (dynamisch)	660 (dynamisch)
Blockierkraft [N]		9900	4500	12500
Vorspannung [N]		0	500	2000
Spannungsbereich [V]		0 bis 1000	0 bis 1000	0 bis 1000
Abmessungen	Länge L [mm]	20 (+ 9mm Endstk.)	47	55
	Diameter D [mm]	25 (30 mm mit Isolation)	25	39,8
Anwendungen/Merkmale		<ul style="list-style-type: none"> - Betriebsspannung 0 bis 1000 V - Betriebstemperatur bis 200 °C - Große Auslenkung bei kleiner elektrischer Kapazität - Integrierter Temperatursensor zum Schutz vor Überhitzung. - Industrie und Forschung. - Für aktive Schwingungsdämpfung, Präzisionsmechanik und -fertigung, aktive Strukturen (Adaptronik) 	<ul style="list-style-type: none"> - Betriebstemperatur -40...80°C - Optik - Metrologie / Interferometrie - Adaptronik - Präzisionsmechanik /Fertigung - Adaptive Mechanik - Aktive Schwingungsdämpfung - Schaltanwendungen - Lasertuning - Krafterzeugung / Materialtest - Nanotechnologie 	<ul style="list-style-type: none"> - Betriebstemperatur -40...80°C - Präzisionsmechanik /-Fertigung - Adaptive Mechanik - Aktive Schwingungsdämpfung - Adaptronik - Statische und dynamische Präzisionspositionierung - Krafterzeugung / Materialtest
Optionen		<ul style="list-style-type: none"> - Bipolare Ansteuerung - DMS-Sensoren für Positionsstabilität - Geometrie: rund, rechteckig, Innenbohrung - Endstücke: flach, sphärisch - Integrierte Kraftdetektorschleiben - UHV-kompatibel bis 10⁻⁹ hPa - Unmagnetische Ausführungen - Verringerte Längentoleranzen 	Vakuum, hoch- und tiefemperatur	Vakuum-, Hoch- und Tiefemperatur
Preis		413,00 €	533,00 €	651,00 €

Tabelle 5.3: Produktliste der Piezoelemente (Blatt 2 von 3) [9]

Tabelle der Piezomotoren (Seite 3 von 3)			
	6. Variante	7. Variante	8. Variante
			
Hersteller	Piezosystem Jena		
Modell	PAHL 18/20	PA 25/12 R2,5	HPA 25/35/10
Hub [μm]	21 (-10/+20)%	31	25/17
Kapazität [μF]	7(\pm 20%)	2.5	350
Auflösung [nm/mV]	0.04	0.06	-
Resonanzfrequenz [kHz]	22	15	35
Steifigkeit [N/ μm]	165	27	900
Blockierkraft [N]	3500	850	35000 (F_{max} in Hubrtng 25000)
Vorspannung [N]	350	150	-
Spannungsbereich [V]	-20...+130	-20...+130	0 V ... +1000
Abmessungen	Länge L [mm]	36	42
	Diameter D [mm]	20	35
Anwendungen/Merkmale	<ul style="list-style-type: none"> - Wafer-Alignment - Mikropositionierung - Scanning - Strahlenablenkung - Dämpfungs- oder Schwingungserzeugung - Ventil-Steuerung - Nanopositionierung 	<ul style="list-style-type: none"> - Schwingungsanregung - Stoßanregung - Test und Beschleunigungssensoren - Stabilisierung - Aktive Schwingungsdämpfung - Kraftstoffeinspritzung - Aktive Motorlagerung - Betriebstemperatur: -60 °C bis +120 °C 	<ul style="list-style-type: none"> - Schwingungsanregung - Stoßanregung - Test und Beschleunigungssensoren - Stabilisierung - Aktive Schwingungsdämpfung - Kraftstoffeinspritzung - Aktive Motorlagerung - Betriebstemperatur: -60 °C bis +120 °C
Optionen	<ul style="list-style-type: none"> - Vakuumversion - Tieftemperaturversion - DMS Sensor als Vollbrücke - Kopfstück - ballige Ausführung Wolframkarbid - andere Varianten auf Anfrage - Mit Endscheibe D=5x2,5mm 3x13,50 € - Sonderausführung 3 x 17,50 € - Sonderausführung 1 x 226,50 € 		
Preis	496,50 €	keine Angabe	keine Angabe

Tabelle 5.4: Produktliste Piezoelemente (Blatt 3 von 3) [10]

Auf Empfehlung von Herrn Dr. Lutz Pickelmann, dem Geschäftsführer von Piezomechanik GmbH fiel die Auswahl der Aktoren auf die ungehauste (nicht vorgespannte Variante) Ausführung. Neben preislichem Vorteil, verfügen die ungehausten Aktoren erfahrungsgemäß über eine kürzere Reaktionszeit als die gehausten Varianten. Durch das Wegfallen der außenliegenden metallischen Hülle werden die Reibungsverluste im Betrieb minimal gehalten, die bessere Wärmeabgabe begünstigt die dynamischen Eigenschaften ebenfalls.

Die Modelle *P-025.10P* der Firma Physik Instrumente GmbH & Co.KG und *PSt 150/14x14/20* der Firma Piezomechanik GmbH erfüllen die Ansprüche der Anwendung lückenlos. Jedoch verfügen die Aktoren der Variante 3 über höheren Blockierkraft und höhere Steifigkeit als die Aktoren der Variante 4 und der existierenden Vorrichtung. Die Steuerung der Niedervoltaktoren *PSt 150/14x14/20* ist ebenfalls kompatibel mit den Aktoren der existierenden dDAC der LLNL-Wissenschaftler. Dadurch kann der Apparative Aufwand der Kollaborationspartner deutlich verringert werden, was die Aktoren der Variante 3 zum eindeutigen Favoriten macht. Zur Validierung der ausgewählten Variante können die Parameter des Piezostapelelementes mit den Anforderungen der Anwendung mit Hilfe des Arbeitsdreiecks verglichen werden.

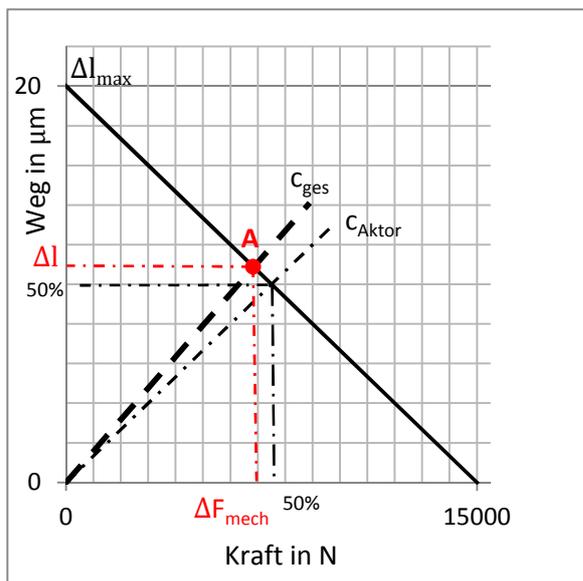


Diagramm 5.2: Arbeitsdreieck aus max. Verstellweg Δl_{\max} und ΔF_{Block} bei jeweiligen max. Betriebsspannung (Δl_{\max} ΔF_{Block} : Daten des gewählten Aktors). A: Arbeitspunkt des gewählten Aktors bei Wechselwirkung mit der

Die Steifigkeit $c_{ges} = \frac{\Delta F_{mech}}{\Delta l}$ der Anwendung wird als Ursprungsgerade in das Diagramm eingetragen. Der Schnittpunkt dieser Geraden mit dem Arbeitsdreieck ergibt den Arbeitspunkt A des gewählten Aktors. Sind die Steifigkeitsgeraden der Anwendung und des Aktors identisch kann die maximale Arbeit verrichtet werden.

Für den dynamischen Betrieb kann die Abschätzung durch die Aktorsteifigkeit und die bewegte Masse definierte Eigenfrequenz erfolgen. Für den zuverlässigen Betrieb sollte der Quotient aus Eigenfrequenz f_0 der Mechanik und der Betriebsfrequenz f mindestens 2 betragen.¹ Die Eigenfrequenz

¹Rechenweg laut Vorgaben von Piezomechanik GmbH

kann wie folgt berechnet werden:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{c_{DAC}}{m_{eff}}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{624 \frac{N}{\mu m}}{340g + \frac{1}{3} \cdot 150g}} = \mathbf{201 \text{ Hz}}$$

Wie schon erwähnt, beträgt die Antriebsfrequenz der existierenden dDAC ca. 100 Hz, was der Bedingung für den dynamischen Betrieb in dieser Anwendung gerecht ist.

$$\text{für } f = 100 \text{ Hz: } \quad \frac{f_0}{f} = \mathbf{2,01} > \mathbf{2}$$

Hiermit gilt die Anforderung an die Durchführung des Experimentes mit mindestens 100 Hz als erfüllt. Werden höhere Betriebsfrequenzen erwünscht, sollte die Eigenfrequenz der Mechanik durch die Erhöhung der Steifigkeit bzw. durch die Reduzierung der bewegten Masse (falls möglich) gesteigert werden. Während der Entwurfsphase wurde die Maßnahme getroffen, die diese Bedingung begünstigt und im Weiteren näher beschrieben wird.

Die Lage des Arbeitspunktes A im Arbeitsdreieck (Diagramm 5.2) und die Erfüllung der dynamischen Bedingung bestätigt die Richtigkeit der Wahl. Der Aktor *PSt 150/14x14/20* kann für die gegebene Aufgabe als tauglich angesehen werden.

5.1.4 Hinweise zur konstruktiven Gestaltung

Für den zuverlässigen Betrieb und hohe Lebensdauer der Piezo-Elemente sind mehrere Faktoren verantwortlich, die bei der Gestaltung der Konstruktion zu berücksichtigen sind¹:

- nur Druckbelastung der Keramik zulässig
- der resultierende Kraftvektor soll parallel zur Aktorachse verlaufen, der Toleranzwinkel α für den ausgewählten Aktor darf maximal $3,6^\circ$ betragen
- der Schwerpunkt der Last soll möglichst auf der Aktorachse liegen
- durch die hohe Beschleunigung entstehende Zugkräfte sind durch die ausreichende Vorspannung des Aktors zu verhindern
- der Dauerbetrieb unter Ausnutzung des Leistungsvermögen des Aktors verkürzt seine Lebensdauer
- das Überschreiten der Betriebstemperatur von 100°C führt zur Reduzierung der Aktoreigenschaften (reversibel)

Die Einbindung dieser und weiteren Kriterien werden im Weiteren näher beschrieben.

¹ Angaben nach Piezomechanik GmbH

5.2 Heizung

Zum Heizen der Probe werden die Hartmetallsitze (Seats) der Diamantstempelzelle mit dem Platindraht umgewickelt dessen Enden an eine Spannungsquelle angeschlossen werden. Diese Art der Widerstandsheizung hat sich bei DESY etabliert und findet eine breite Anwendung. Der Vorteil dieser Methode ist die geringe Größe des Heizers bei hoher Energiedichte. Erfahrungsgemäß können mit dreizehn Windungen umgewickelten Seats die Probe bis zu 800°C erwärmen. Dabei wird der Platindraht von 0,2 mm Durchmesser mit einer 0,3 mm Steigung aufgewickelt. Unter diesen Gesichtspunkten und aus dem Kostenfaktor erfüllt diese Lösung die gestellten Anforderungen zweifellos. Zur Implementierung der Heizung in die Diamantstempelzelle sind folgende Arbeitsschritte zu machen:

- Der Hartmetallsitz (Seat) auf dem vorgesehenen Dorn (Abbildung 5.5 und 5.6) montieren und in einer Dreh- bzw. Wickelmaschine einspannen



Abbildung 5.5: Dorn



Abbildung 5.6: Hartmetallsitz

- Die Oberfläche des Sitzes mit Diamantfeile leicht anrauen
- Caramabond Keramikkleber vorbereiten: die Konsistenz sollte der Baumarktfarbe ähnlich sein (verdünnen mit kalkhaltigem Wasser)
- Keramikkleber in zwei Schichten auf die Sitzoberfläche auftragen (zwischen den Schichten mehrere Stunden warten, Endschichtdicke ca. 0,5 mm)
- Ca. einen Tag trocknen lassen

- Sitz mit Kleber wieder zylindrisch schleifen mit kunststoffgebundenem Schleifkörper, wenn Teile der Kleberschicht rausbrechen, nachpinseln, trocknen lassen mit entsprechender Wartezeit, erneut schleifen

Wichtig: Schleifkörper muss absolut rund laufen (vor dem Schleifen Abziehen mit Diamant); möglichst druckfrei schleifen (Endergebnis Abbildung 5.6)

- Plastikhülse (Ultramid-Plastik, da sich der überschüssige Kleber später gut ablösen lässt) als Gegenstück auf den Dorn schrauben; 2. Schraube zur Befestigung des Drahts für die Wicklung
- Heizdrahtrolle an der Drehbank drehbar montieren
- Heizwicklung wird auf Zug gewickelt, daher Bremse notwendig (Drahtbremse zwischen 2 Holzklötzen o.ä. einspannen, Bremse muss fest an der Drehbank montiert sein; Abbildung 5.7)

Draht muss sich beim Wickeln so gerade noch ziehen lassen (kurz vor dem Abreißen)

- Dorn samt Hartmetallsitz einspannen; für Rundlauf sorgen

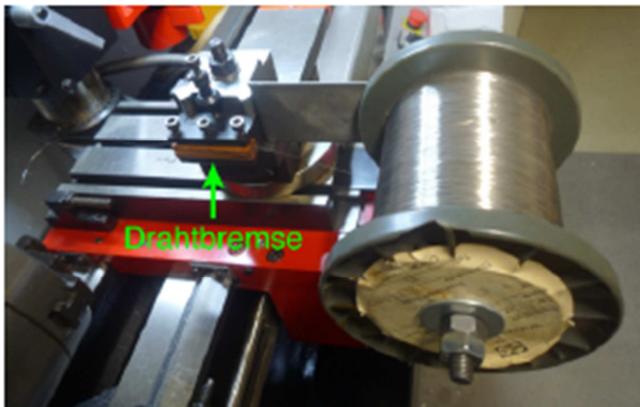


Abbildung 5.7: Heizdrahtrolle montiert an der Drehbank

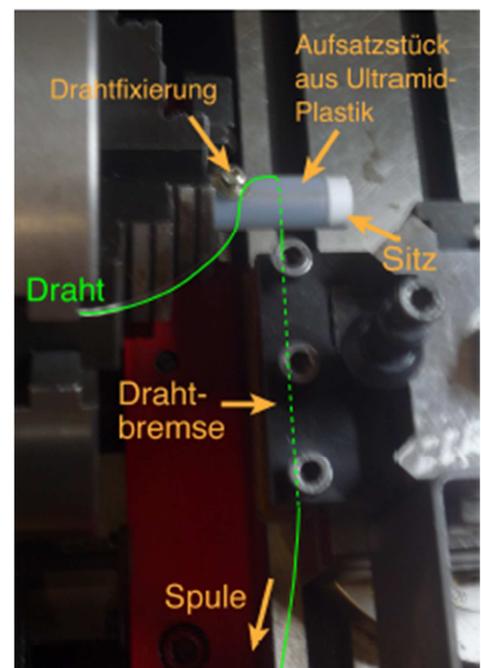


Abbildung 5.8: Anordnung des Heizdrahtes

- Den Vorschub der Drehbank auf Drahtdurchmesser + 0,1..0,15 mm einstellen.
Bsp.: Drahtdurchmesser = 0,2 mm => Vorschub = 0,3..0,35 mm

Wichtig: für Abstand zwischen den Windungen sorgen, Kontakt zwischen den Windungen führt zum Kurzschluss. Möglichst viele Windungen auf den Sitz aufbringen

- Den Abstand zwischen der Drahtbremse und Dorn möglichst kurz halten; die Spule und geklemmter Draht bilden einen ca. 90° Winkel (Abbildung 5.8)
- Start der Wicklung auf Plastikaufsatz ca. 2-3 mm vor dem Sitzanfang setzen. Auf dem Sitz auf die gleichmäßige Steigung achten.
- Kurz vor dem Erreichen des Sitzende den Wickelvorgang stoppen; die Bremse bleibt festgesetzt sodass die gewickelten Windungen auf Zug bleiben (Abbildung 5.9).

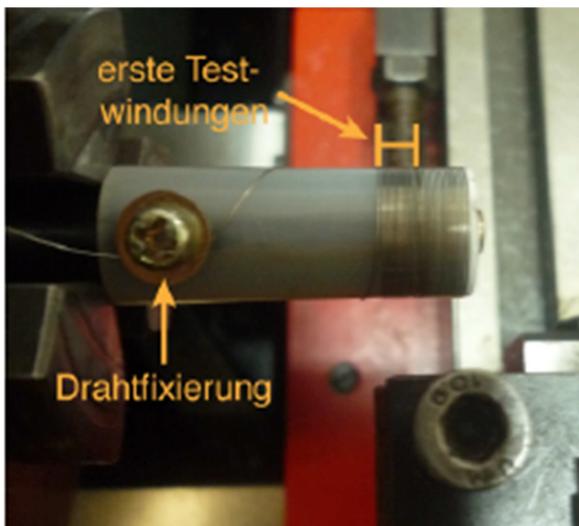


Abbildung 5.9: Wickelvorgang beendet

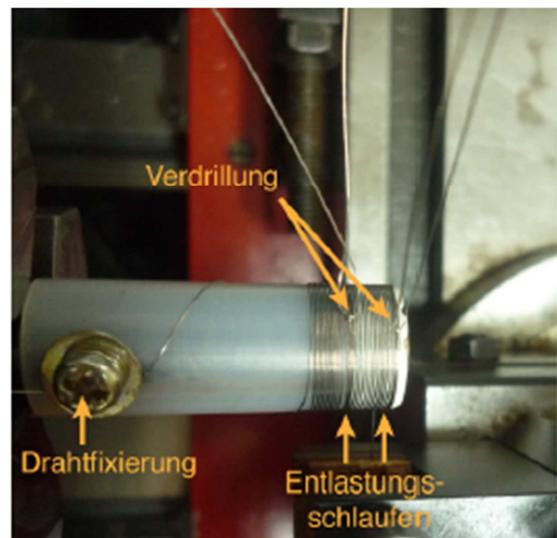


Abbildung 5.10: Entlastungsschlaufen

- Zwei Stücke Heizdraht abschneiden (ca. 30 cm) und Entlastungsschlaufen an die beiden Enden der Spule anbringen

Entlastungsschlaufen wirken den großen Spannungsspitzen beim Einschalten der Heizung entgegen und erhöhen zusätzlich die mechanische Stabilität der Spulenkontaktierung. Die Position der Schlaufen in Bezug auf Windungen entscheidet über den Gesamtwiderstand der Spule

- Entlastungsschlaufen auf erste und letzte Windung der Wicklung des Sitzes anbringen (Abbildung 5.10).

Schlaufen müssen gut anliegen und dürfen sich nicht mehr bewegen. Die beiden Drahtenden der Schlaufe werden mit speziellem Hilfsmittel (Abbildung 5.11) verdrillt.

- Fertige Wicklung mit Ceramabond einstreichen. Darauf achten, dass der Keramikkleber gut zwischen die einzelnen Windungen läuft. Mehrere Stunden trocknen lassen, erneut einstreichen.

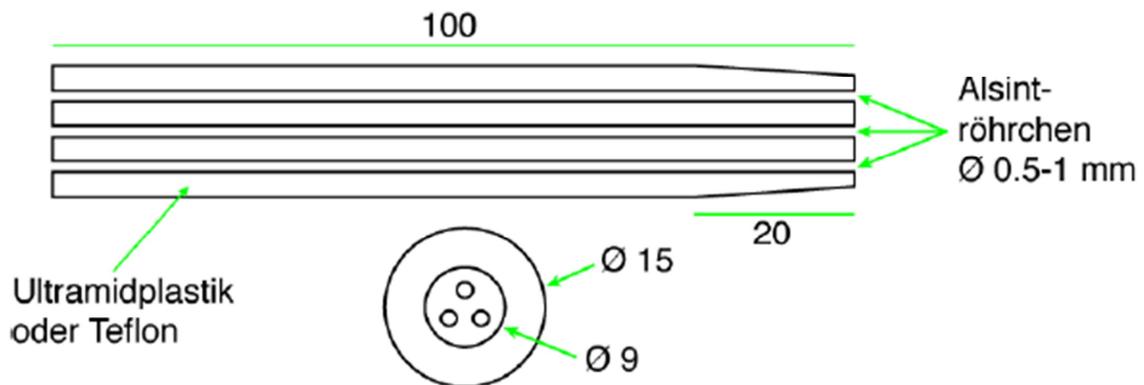


Abbildung 5.11: Hilfswerkzeug zum Verdrillen des Heizdrahtes

- Fixierung der Drähte lösen. Die ersten Testwicklungen vorsichtig vom Keramikkleber lösen bis zur Entlastungsschleufe.
- Die 3 Drähte an den Beiden Enden der Spule jeweils mit den Hilfswerkzeug (Abbildung 5.11) verdrillen. Zur Kontaktierung der Heizung ca. 6-8 cm stehen lassen.
- Zur endgültigen Aushärtung fertige Spule nochmal bei ca. 130°C für zwei Stunden in den Trockenschrank legen
- Widerstandsmessung entscheidet über die Qualität der Spule. Widerstand sollte den Wert von mindestens 0,8- 0,9 Ω betragen, sonst muss eine neue Spule gewickelt werden.[8]

Nach der erfolgreichen Fertigung kann der präparierte Hartmetallsitz in die Diamantstempelzelle montiert werden (Abbildung 5.12).

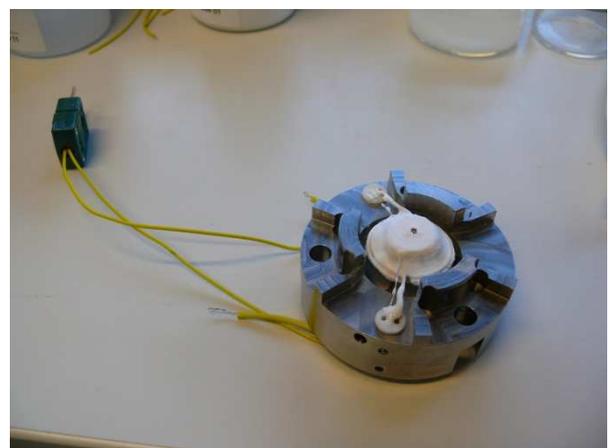


Abbildung 5.12: Hartmetallsitz, präpariert mit Heizspule (links) und montiert in die DAC (rechts);

Foto: Iris Schwark

5.3 Design der dynamischen Diamantstempelzelle

5.3.1 Gehäuse

Während der Entwurfsphase wurde die Entscheidung getroffen, den Antrieb der Diamantstempelzelle auf drei um 120° Versetzte Piezo-Stapel-Elemente zu verteilen. Durch diesen Schritt wird vor allem die höhere Standzeit der Keramik erzielt, ohne den

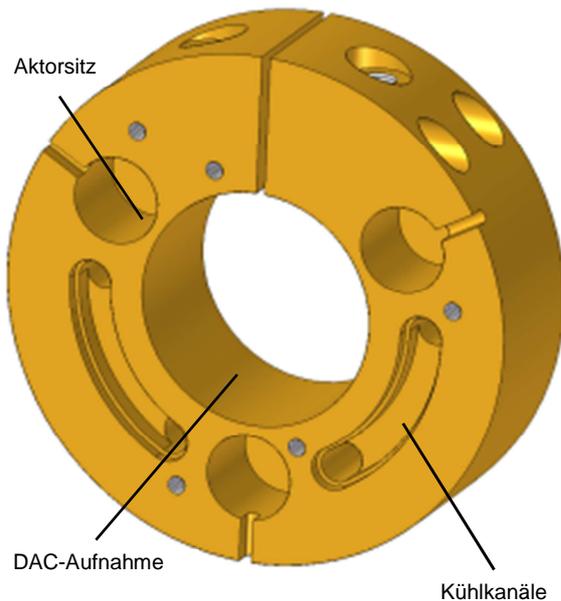


Abbildung 5.13: dDAC Gehäuse aus Messing als Klemmvorrichtung

Budgetrahmen des Projektes zu sprengen. Das Leistungsvermögen des Antriebes wird dadurch ebenfalls gesteigert. Die Verwendung von dieser Anordnung durch Kombination mit Halterung der DAC als Klemme führte zur Gestaltung des Gehäuses in Form vom massiven Ring (Abbildung 5.13). Die drei Sacklochbohrungen sind für die Aufnahme der Piezoelemente vorgesehen. Um die Aktoren im Dauerbetrieb vor Überhitzung zu schützen, wird eine Kühlung eingesetzt. Die Wärmeabfuhr wird durch die Wasserumlaufkühlung realisiert. Dazu wurden im Gehäuse die Kühlkanäle vorgesehen.

Diese sind als Durchgehende Bohrungen, verbunden durch ausgefräste Taschen, eingearbeitet. Bei der Montage werden die offenen Taschen im Hartlötverfahren mit Stopfen dicht abgeschlossen. Die Lötverbindungen sind anschließend unter einem Luftdruck von ca. 10 bar auf Dichtheit zu überprüfen. Im Betrieb wird die dDAC an die Kühlwasserversorgung der Beamline angeschlossen. Als Gehäusewerkstoff wird Messing wegen seiner guten Wärmeleitfähigkeit und mechanischer Stabilität als gut geeignet angesehen. Die relativ hohe Masse des Werkstoffes wirkt hemmend gegen die Ausbreitung erzeugter Schwingungen, was die Gesamtkonstruktion hinsichtlich der Robustheit positiv beeinflusst.

Der Innendurchmesser des Messingringes ist auf 55 mm gesetzt worden, so kann die Konstruktion mit Hilfe entsprechender Adapterringe universell mit beiden Ausführungen der Diamantstempelzellen, „Symmetrisch“ und „Pistonzylinder“ in Betrieb genommen werden. Durch die Fertigung anderer Adapter kann die Kompatibilität mit anderen Zelltypen (Außendurchmesser ≤ 55 mm) erweitert werden. Die Adapterringe sind ein Bestandteil dieser Konstruktionsarbeit.

Das Festklemmen der Diamantstempelzelle im Gehäuse erfolgt durch die zwei M6 Zylinderschrauben. Das erforderliche Anzugsdrehmoment der Schrauben ist zu bestimmen.

Klemmkraft zum Einspannen der DAC

Die Berechnung der Klemmkraft wird nach „Roloff-Matek – Maschinenelemente“ durchgeführt. Die Gehäuseklemme wird als eine Schelle mit dem gelenk D angesehen, deren Durchmesser D_m etwa dem mittleren Klemmendurchmesser entspricht. Für die erforderliche Anpresskraft je Gehäusehälfte gilt aus der Beziehung $F_R = F_N \cdot \mu \geq K_A \cdot F_a$:

$$F_N \geq \frac{K_A \cdot F_a}{\mu}$$

Mit $F_N = F_{Kl} \cdot \frac{l_2}{l_1}$ (Abbildung 5.14) mit Schrauben-

anzahl $n = 2$ und Haftsicherheit $S_H = 1,2$ die erforderliche *Klemmkraft je Schraube*:

$$F_{Kl} \geq \frac{K_A \cdot F_a \cdot S_H \cdot l_1}{n \cdot \mu \cdot l_2} = \frac{1,4 \cdot 6240N \cdot 2 \cdot 43,75 \text{ mm}}{2 \cdot 0,2 \cdot 87,5 \text{ mm}} = \mathbf{21840N}$$

$F_a = F_{mech}$ – axiale Kraft des Antriebes (siehe Kap. 5.1.2)

$l_1 = 43,75 \text{ mm}$, $l_2 = 87,5 \text{ mm}$ - Abstände der Kräfte F_N, F_{Kl} vom Drehpunkt D

Betriebsfaktor $K_A = 1,4$ angenommen für schwingenden/stoßartigen Betrieb

Haftbeiwert $\mu = 0,2$ als Richtwert für Querpressverband Kupferlegierungen

Anzugsdrehmoment der Zylinderschrauben

Die Montage-Vorspannung F_{VM} der Zylinderschrauben soll mindestens genau so groß sein wie die erforderliche Klemmkraft F_{Kl} je Schraube:

$$F_{VM} \geq F_{Kl}$$

Aus dieser Beziehung das *erforderliche Anzugsdrehmoment* der Schrauben:

$$\begin{aligned} M_A &\geq F_{VM} \left(\frac{d_2}{2} \cdot \tan(\varphi + \rho') + \mu_K \cdot \frac{d_K}{2} \right) \\ &= 21840N \cdot \left(\frac{5,35 \text{ mm}}{2} \cdot \tan(3,41^\circ + 0,1155^\circ) + 0,15 \cdot 0,65 \cdot 6 \text{ mm} \right) \\ &= 16373\text{Nm} \cong \mathbf{16,4Nm} \end{aligned}$$

$d_2 = 5,35 \text{ mm}$ – Flankendurchmesser des Gewindes (hier: M6)

$\varphi = 3,41^\circ$ - Steigungswinkel des Gewindes

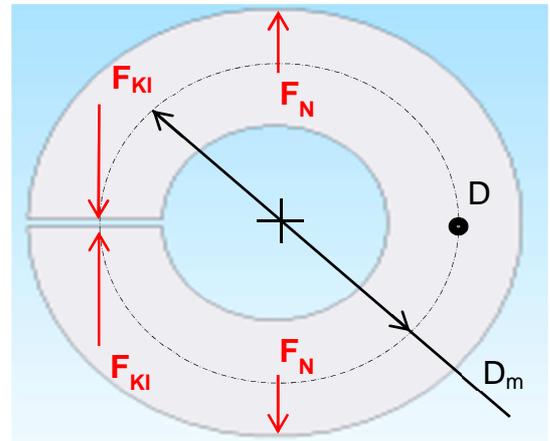


Abbildung 5.14: Klemm- und Spannkraft am Gehäuse

$\rho' = 0,1155$ – Reibungswinkel des Gewindes (hier: mit $\mu_G = 0,1$ im Gewinde, AlMg-Legierung und Stahl, geölt)

$\mu_K = 0,15$ – Reibungszahl für AlMg-Auflagefläche und Schraubenkopf aus Stahl, schwarz oder phosphatiert

d – Gewindenenddurchmesser

$\frac{d_K}{2} = 0,65 \cdot d$ - wirksamer Reibungsdurchmesser in der Schraubenkopfaufgabe.[7]

Somit wird das Drehmoment der Zylinderschrauben auf $M_A = 20Nm$ festgelegt.

5.3.2 Montage der Piezostapelelemente

Die ungehauste Piezostapelelemente PSt 150/14x14/20 werden mit der Option „mit sphärischen Endstücken“ bestellt. Die sogenannte Kalotte (Abbildung 5.15, grauhinterlegt), die an die Keramikfläche geklebt ist, verfügt über eine Kugeloberfläche vom Radius $r=500mm$ und besteht aus festem Legierungsstahl. Im Berührungspunkt gegen die Ebene Fläche der Mechanik entsteht ein Punkt-Fläche-Kontakt. Durch diese Option werden Biegespannungen in der Piezokeramik vermieden. Die hohen Spannungsspitzen im Berührungspunkt werden durch die

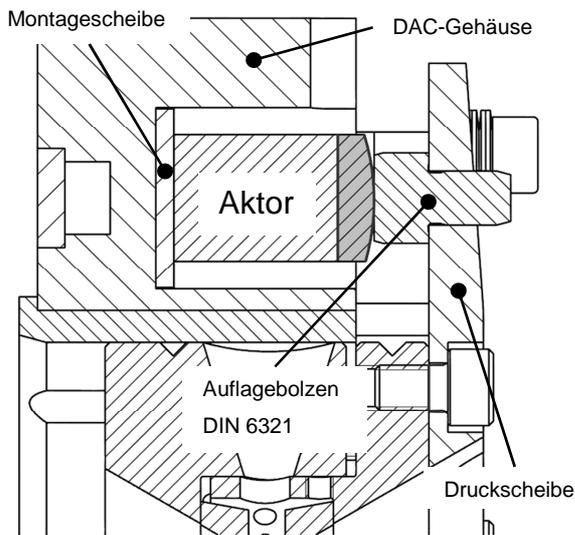


Abbildung 5.15: Piezostapelelement montiert im Gehäuse (Schnittdarstellung)

Auflagebolzen DIN 6321 aufgenommen, der Kraftfluss wird über deren Auflagefläche an die Druckplatte weitergeleitet.

Das Verkleben der Aktoren auf den speziell vorgesehenen Montagescheiben erleichtert die Positionierung im Gehäuse der dDAC bei der Montage. Durch die Füllwirkung der dünnen Klebeschicht ($<50\mu m$) werden die Abweichungen der Planitäten der Fügeflächen ausgeglichen[6]. Als Klebstoff kämen die Produkte z.B. der Firma EPO-TEK¹ in Frage.

Die Montage der Druckplatte ist so konzipiert, dass die eingebauten Tellerfedern nicht nur der Rückstellbewegung der DAC dienen, sondern auch für die Vorspannung der ungehausten Aktoren sorgen. Die parallel angeordnete Tellerfedern erhöhen die Ge-

¹ Die Empfehlung der Firma Piezotechnik GmbH: der Glas- und Keramikkleber EPO-TEK 353ND-T

samtsteifigkeit und somit die Eigenfrequenz des Aufbaus, was die Bedingung für dynamischen Dauerbetrieb mit Frequenz über 100Hz begünstigt (siehe Kap.5.1.3).

Die optimale Vorspannung beträgt einige Prozent der Blockierkraft. Erst beim hochdynamischen Betrieb mit Schaltzeiten unter 1ms, wird es empfohlen die Vorspannkraft bis 50% der maximalen Blockierkraft zu wählen. Um den Anhaltswert für das Anzugsdrehmoment der Befestigungsschrauben zu bekommen wird die Vorspannung von 20% der Blockierkraft angenommen.

Die definierte Beziehung $F_{VM} = 0,2 \cdot F_{Block}$ mit Anzahl der Schrauben $n = 3$ ergibt die *erforderliche Vorspannkraft* je Schraube:

$$F_{VM} = 0,2 \cdot \frac{F_{Block}}{n} = 0,2 \cdot \frac{15000N}{3} = \mathbf{1000N}$$

Mit F_{VM} – Vorspannkraft, $F_{Block} = 15000N$ – die maximale Blockierkraft des Piezoaktors (Herstellerangaben)

Das *erforderliche Anzugsdrehmoment* kann wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned} M_A &\geq F_{VM} \left(\frac{d_2}{2} \cdot \tan(\varphi + \rho') + \mu_K \cdot \frac{d_K}{2} \right) \\ &= 1000N \cdot \left(\frac{4,48 \text{ mm}}{2} \cdot \tan(3,25^\circ + 0,1155) + 0,14 \cdot 0,65 \cdot 5 \text{ mm} \right) \\ &= 586,7 \text{ Nmm} \approx \mathbf{0,6 \text{ Nm}} \end{aligned}$$

$d_2 = 5,35 \text{ mm}$ – Flankendurchmesser des Gewindes (hier: M5)

$\varphi = 3,25^\circ$ – Steigungswinkel des Gewindes

$\rho' = 0,1155$ – Reibungswinkel des Gewindes (hier: mit $\mu_G = 0,1$ im Gewinde, AlMg-Legierung und Stahl, geölt)

$\mu_K = 0,14$ – Reibungszahl für Stahlauflagefläche, spanend bearbeitet und Schraubenkopf aus Stahl, schwarz oder phosphatiert

d – Gewindenenddurchmesser

$\frac{d_K}{2} = 0,65 \cdot d$ - wirksamer Reibungsdurchmesser in der Schraubenkopfauflage. [7] Die

Schrauben der Druckplatte sind mit dem Anzugsdrehmoment von $M_A \geq 0,6 \text{ Nm}$.

Zwei Schaftschrauben DIN 473 nehmen die radiale Kräfte der Druckplatte auf und übernehmen auf diese Weise die Führungsfunktion. Zwecks besseren Freigängigkeit ist es empfehlenswert die Laufflächen mit einem für Beamline zugelassenen Schmiermittel zu schmieren.

5.3.3 Zusammenbau

Die Außenmaße der Konstruktion (Abbildung 5.16) ermöglichen die leichte Montage auf dem Proben­tisch der Beamline und bieten dem Benutzer gute Zugänglichkeit unmittelbar zur Diamantstempelzelle. Die Nachjustierung des Druckes kann

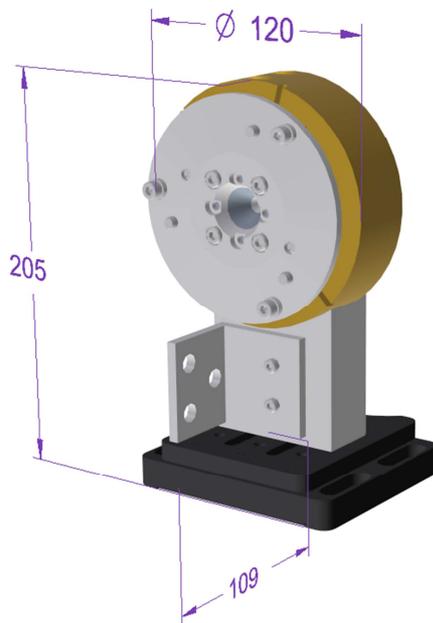


Abbildung 5.16: Dynamische DAC, Außenmaße in mm

durchgeführt werden ohne die Apparatur vom Proben­tisch demontieren zu müssen. Die Anordnung der Antriebsaktoren am äußeren Ring um die Diamantstempelzelle gibt die Möglichkeit die Dicke des Gehäuses möglichst schmal zu halten. Dadurch wird die Wechselwirkung des Strahlengangs mit der Konstruktion vermieden. Außerdem kann bei dieser Geometrie die Durchführung der Experimente mit Laserheizung durchaus realisierbar sein. Auf grund von hohen Temperaturen ($>3000^{\circ}\text{C}$) sollte die Kühlleistung der dynamischen DAC evtl. gesteigert werden.

Der massive Standfuß wird mit einem Winkel mit drei 9,7 mm Bohrungen versehen. Die Montage der BNC-Stecker am Standfuß dient der besseren Handhabung und Robustheit des Produktes.

Der massive Standfuß wird mit einem Winkel mit drei 9,7 mm Bohrungen versehen. Die Montage

5.4 Steuerung

Die Ansteuerung der Piezostapelelemente soll durch einen Funktionsgenerator realisiert werden. Dazu steht das Signalgenerator *Agilent 33500B-Series* des Hauses *Agilent Technology* zur Verfügung. Die Signalgeneratoren der Familie 33500B mit ihrer exklusiven Trueform-Signalerzeugungstechnologie sind leistungsfähiger und vielseitiger als herkömmliche DDS-Generatoren und bieten zudem eine überlegene Signalqualität. [Q] Zum Betreiben der Piezostapelelemente werden die Spannungen von ca. 0..150 V benötigt. Dazu wird das Signal des Funktionsgenerators um ca. das 15-fache verstärkt. Um die geforderte Blockierkraft und Stellweg der Piezoelemente im Dauerbetrieb zu bewerkstelligen, bedarf an einem leistungsfähigem Verstärker.

Zur Auswahl wurden zwei Verstärker für Niedervoltaktoren der Firmen Piezomechanik GmbH und Piezosystem Jena GmbH angeboten. Die Eckdaten der Verstärker sind in der Tabelle 5.5 aufgeführt.

Betriebsparameter der Verstärker		
	Piezomechanik GmbH	Piezosystem Jena GmbH
	LE 150/500	E-103-921 mit 2 x E-280-000
Input:		
Signal:	+/- 5 V (+/- 10 V mit Reduzierung)	+/-10 V
Output:		
Anschluss:	BNC	BNC
Spannungsbereich:	0 V ... 200 V	-20 V ... 130 V
DC-Offset	0 V ... 200 V	k.A.
Peakstrom	5 A	3,2 A ¹
Dauerstrom	1800 mA	1600 mA
Preis:	5550,00 €	4781,5 €

Tabelle 5.5: Niedervoltaktor-Verstärker

Beim Dauerbetrieb mit Frequenz f kann die *mittlere erforderliche Leistung* P_m der Aktoren abgeschätzt werden zu:

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \cdot f \cdot n = \frac{1}{2} \cdot 14,5 \mu F \cdot (180 V)^2 \cdot 200 Hz \cdot 3 = \mathbf{140,94 W}$$

Mit $C = 14,5 \mu F$ – Aktorkapazität

$U = 180 V$ – Betriebsspannung(Spitze-Spitze) bei semipolarer Ansteuerung

$f = 200 Hz$ – Betriebsfrequenz (angestrebter Wert)

$n = 3$ – Anzahl der Aktoren

Der nötige *mittlere Ladestrom* \bar{I} ergibt sich zu:

$$\bar{I} = C \cdot U \cdot f = 14,5 \mu F \cdot 180 V \cdot 200 Hz = \mathbf{1566 mA}$$

Bei der Ansteuerung mit dem Verstärker von Piezosystem Jena GmbH mit Spannung von 0...130 V kann der Aktor seinen vollen Stellweg auf Grund reduzierter Spannung nicht erreichen. Der maximale Hub reduziert sich um ca. 10%, dennoch werden die gestellten Anforderungen erfüllt. Der Betrieb mit reduziertem Stellweg ergibt die *mittlere erforderliche Leistung* analog zu:

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \cdot f \cdot n = \frac{1}{2} \cdot 14,5 \mu F \cdot (150 V)^2 \cdot 200 Hz \cdot 3 = \mathbf{98 W}$$

Daraus der Resultierende *mittlere Ladestrom* \bar{I} :

$$\bar{I} = C \cdot U \cdot f = 14,5 \mu F \cdot 150 V \cdot 200 Hz = \mathbf{1305 mA}$$

Die mit einem Piezoaktor erzielbare Geschwindigkeit und Beschleunigung hängen vom Peakstrom ab. Bei ausreichender Stromstärke der Quelle, kann ein Aktor nach schlagartigem Spannungsanstieg seine nominale Auslenkung in 1/3 der Periode der Reso-

¹ Nach Angaben von Herrn Kay Steuerwald (Piezosystem Jena GmbH), der Wert für Peakstrom angenommen gleich dem Ausgangsstrom des Netzteils 450W

nanzfrequenz erreichen:

$$T_{min} = \frac{1}{3 \cdot f_0} = \frac{1}{3 \cdot 47 \text{ kHz}} \approx 7 \mu\text{s}$$

mit T_{min} – kürzeste Ausfahrzeit des Aktors

$f_0 = 47 \text{ kHz}$ – Resonanzfrequenz des Aktors (Herstellerangaben)

Peakstrombedarf für einen harmonischen Sinusbetrieb:

$$\hat{I} = \pi \cdot C \cdot U \cdot f \cdot n$$

mit LE 150/500:

$$\hat{I} = \pi \cdot 14,5 \mu\text{F} \cdot 180 \text{ V} \cdot 200 \text{ Hz} \cdot 3 = 4919.7 \text{ mA}$$

mit E-103-921:

$$\hat{I} = \pi \cdot 14,5 \mu\text{F} \cdot 150 \text{ V} \cdot 200 \text{ Hz} \cdot 3 = 4099.8 \text{ mA} [9]$$

Hinsichtlich des Spitzenstrombedarfs für hochdynamischen Betrieb, erfüllt der Verstärker E-103-921 mit zwei E-280-000 Modulen nicht die Anforderungen. Die teurere Variante der Firma Piezomechanik wird gewählt.

Der Arbeitspunkt des Aufbaus, eingetragen in das Betriebsdiagramm des Verstärkers (Abbildung 5.17), ergibt für Sinusbetrieb mit der Steuerspannung $U = 150 \text{ V}^1$ und der Gesamtkapazität der drei Aktoren $C = 34,5 \mu\text{F}$ die steuerungseitig erreichbare Fre-

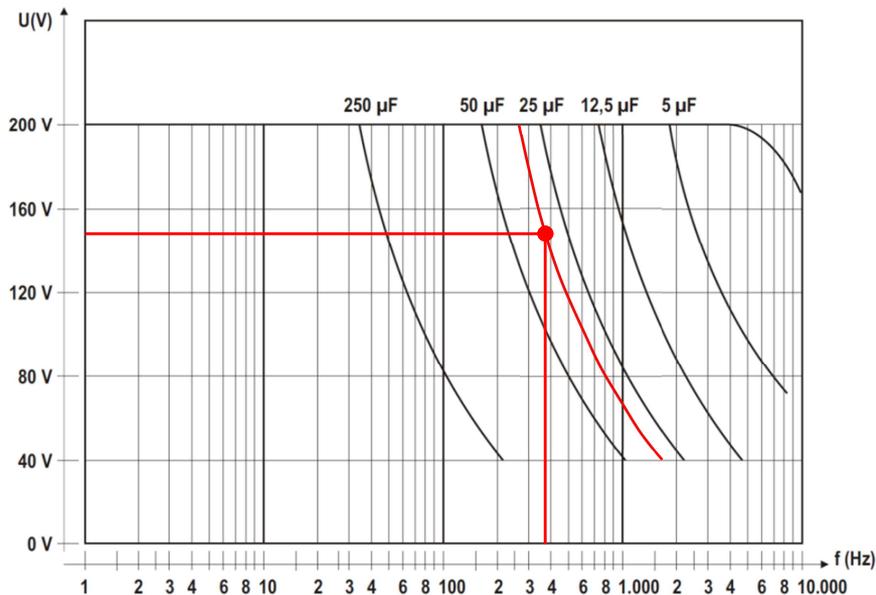


Abbildung 5.17: LE200/500 Ansteuergrenzen

quenz f von ca. 380 Hz. [11] Die tatsächliche Betriebsfrequenz, unter Einfluss der Reibung und elektrischen Verlusten, wird empirisch in der Betriebsphase ermittelt.

¹ unipolarer Betrieb

6 Zusammenfassung/Ausblick

Das Ergebnis dieser Arbeit ist das Erarbeitete Konzept der dynamischen Diamantstempelzelle. Die Fertigungs- und Montagephase des Produktes konnten leider nicht rechtzeitig zum Abgabetermin abgeschlossen werden. Die Auslastung der Werkstatt und Lieferzeiten der Kaufteile verlegen den Termin der Fertigstellung um weitere 3 Wochen. Aufgrund der relativ langen Dauer der Fertigung und Beschaffung von Teile, ist es empfehlenswert bei angehen von solchen Arbeit schon in der frühen Phase den Kontakt mit Entsprechenden Ansprechpersonen (Werkstattmeister, Vertriebsmanager, Verkaufsleiter etc.) herzustellen. Durch Aufrechthaltung der Kommunikation können Fehler vermieden und Änderungen produktiver umgesetzt werden.

Die Gestalt des Produktes ist vorgesehen für eventuelle Erweiterung oder Anpassung an die anderen Randbedingungen der Beamline z.B. Kombination mit weiteren Arten der Diamantstempelzellen, Verwendung anderer Piezostapelelemente oder Unterbringung der Vorrichtung in die andere Beamlines. All das macht das Produkt interessant für die weitere Entwicklung.

Die verwendete Technik der piezokeramischen Aktoren wird bei anspruchsvollen Positionieraufgaben von immer größerer Bedeutung. Vorausschauend zu sagen, kann die Entwicklung der dynamischen Diamantstempelzelle mit Innovationen der Piezotechnologie weiter verbessert werden. Die Vorsätze dieser Arbeit können durchaus weiter fortgeschritten werden. Eine mögliche Verbesserung der Dynamik durch die Aktive Vorspannung der Mechanik ist vorstellbar und könnte in den weiteren Projekten näher betrachtet werden. Die Geometrie des Aufbaus kann mit Hilfe einer FEM-Simulation hinsichtlich der Wärmeentwicklung untersucht und evtl. optimiert werden.

7 Literaturverzeichnis

- [1] **Dynamic diamond anvil cell (dDAC): A novel device for studying the dynamic-pressure properties of materials**
William J. Evans, Choong-Shik Yoo, Geun Woo Lee, Hyunchoe Cynn, Magnus J. Lipp u.a.; American Institute of Physics.
- [2] **Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY**
http://www.helmholtz.de/helmholtz_zentren_netzwerke/zentrum/detailansicht/deutsches_elektronen_synchrotron_desy/
- [3] **High-Temperature and High-Pressure Crystal Chemistry**
Robert M. Hazen, Robert T. Downs; Mineralogical Society of America
- [4] **Grundlagen der Konstruktionslehre**
Klaus-Jörg Conrad; Carl Hanser Verlag München Wien
- [5] **Messing**
<http://de.wikipedia.org/wiki/Messing#Verwendung>
- [6] **Einführung in die Piezomechanik**
<http://www.piezomechanik.com/de/home/introduction/index.html?1=>; Piezomechanik_Katalog_D_2010-05-05_web
- [7] **Roloff/Matek Maschinenelemente**
Herbert Wittel, Dieter Muhs, Dieter Jannasch, Joachim Voßiek; Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011
- [8] **Wicklung für die Heizung der Hydrothermale Diamantstempelzelle**
von Anke Watenpul; Fotos von Markus Kowalski; DESY-HASYLAB
- [9] **Piezo Nano Positioning**
Katalog der Firma Physik Instrumente (PI) GmbH & Co.KG
- [10] **Produktübersicht**
http://www.piezosystem.de/piezo_nanopositionierung/piezo_aktoren_nano_positionierspositi/stapelaktoren/
- [11] **Elektronische Ansteuerungen für die Piezomechanik: technische Daten**
<http://www.piezomechanik.com/de/home/allcatalogs/index.html>

8 Anhang

9 Eidesstattliche Erklärung