

Schnelles Ventil zur Erzeugung sehr kurzer Gasimpulse

D. Gerlich, G. Jerke, U. Muck, and U. Person

Fakultät für Physik, Universität Freiburg, D 7800 Freiburg, Germany

Es wurde ein neues piezoelektrisches Ventil entwickelt, das sich durch schnelle Schaltzeiten, hohe Repetitionsraten und kompakte Bauweise auszeichnet. Die einfache Konstruktion ist sehr bedienungsfreundlich und erlaubt ein schnelles Auswechseln der Einzelteile und problemlose Justierung ohne Demontage. Das Ventil eignet sich einerseits zur Erzeugung sehr kurzer Molekularstrahlimpulse (bis hinab zu 10 μs) und kann andererseits zum schnellen Schalten oder Regeln eines kontinuierlichen Gasstromes eingesetzt werden.

In dieser Sammlung sind verschiedene Unterlagen zusammengestellt. Der mechanische Aufbau des Ventils wird beschrieben und es werden Hinweise auf Eigenschaften des Dichtungsmaterials und der piezoelektrischen Keramik gegeben. Ein Abschnitt enthält detaillierte Hinweise für die Einjustierung des Ventils und damit verbundene Möglichkeiten für Fehlerquellen. Weitere Kapitel fassen verschiedene gemessene Betriebsdaten zusammen und geben Hinweise zur benötigten Versorgungselektronik.

INHALT

1 Aufbau des Ventils

- 1.1 Die einzelnen Bauteile des Ventils und ihre Funktion
- 1.2 Das Funktionsprinzip des gepulsten Ventils
- 1.3 Anwendungsbereiche

2 Die Dichtung und das piezoelektrische Element

- 2.1 Das Dichtungsmaterial
- 2.2 Das Piezo-Element
- 2.3 Das Verkleben der Dichtung

3 Zusammenbau und Justierung

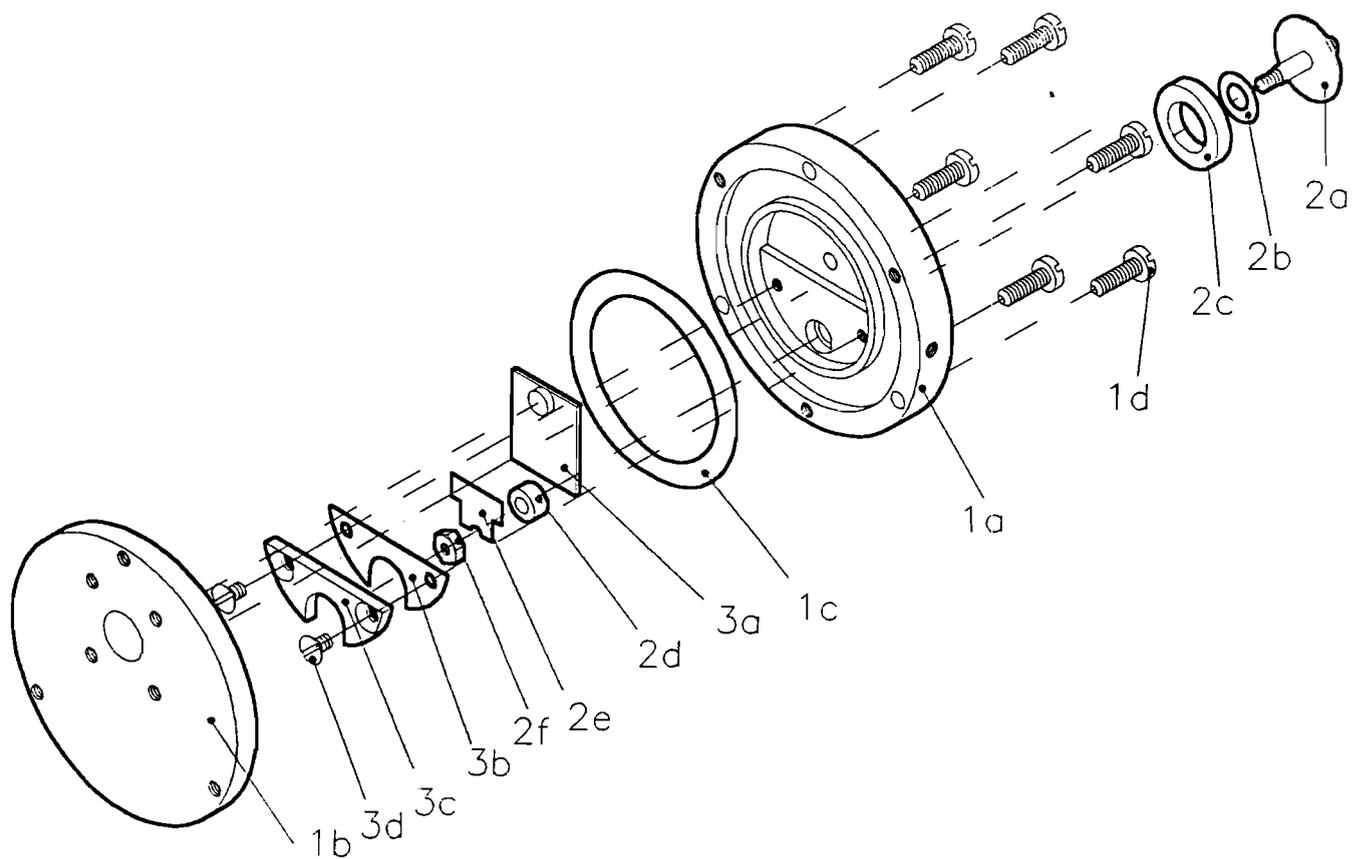
- 3.1 Der Zusammenbau des elektrischen Anschlusses
- 3.2 Das Einsetzen des Piezo-Elementes
- 3.3 Die Justierung

4 Eigenschaften des Ventils

- 4.1 Betriebsarten
- 4.2 Der dynamische Betrieb
 - 4.2.1 Die Ansteuerpulsweite
 - 4.2.2 Die Vorspannung
 - 4.2.3 Dynamische Tests des Piezo-Elements
 - 4.2.4 Teilchenfluss
- 4.3 Charakteristische Betriebsdaten und Spezifikation

5 Ansteuerelektronik

This report describes a fast, compact pulsed gas valve, which allows the formation of pulses below 25 μs at repetition rates above 3 kHz. It is based on a 12x12 mm² piezoelectric bimorph plate which is driven with 100 - 300V pulses. The valve has been developed 20 years ago by D. Gerlich and his coworkers, when he was in the group of Prof. Dr. Ch. Schlier at the Fakultät für Physik of the Universität Freiburg. Many tests described in the following were performed by G. Jerke during his Diplomarbeit [jer90]. Important technical contributions were due to U. Person and U. Mück.



- | | | | |
|----|-----------------------------|----|--|
| 1a | Gehäuse mit Gasanschluß | 2e | Kontaktblech |
| 1b | Ventildeckel mit Düse | 2f | Mutter M1.7 |
| 1c | O-Ring | 3a | Piezo-Element
mit aufgeklebter Dichtung |
| 1d | Zylinderkopfschrauben M2x15 | 3b | Teflonplatte |
| 2a | elektrische Durchführung | 3c | Klemmhalterung |
| 2b | O-Ring | 3d | Senkkopfschrauben M1.7x6 |
| 2c | Stützring (Stenan) | | |
| 2d | Zentrierring (Degussit) | | |

Abb. 1: Aufbau des piezoelektrischen Ventils, der Abbildungsmaßstab ist etwa 1:1.

1 Aufbau des Ventils

1.1 Die einzelnen Bauteile des Ventils und ihre Funktion

Die isometrische Zeichnung in Abb.1 liefert einen Überblick, wie die einzelnen Bauteile angeordnet sind.

Nummer:	Einzelteile:	Funktion:
1a	Gehäuse mit Gasanschluß	Grundkomponente, auf der alle Einzelbausteine sitzen. In das Gehäuse ist ein Mini-Cajon-Anschluß als Gaseinlaß eingeschweißt.
1b	Ventildeckel mit Düsenöffnung	Die Düse wird durch die auf dem Piezo-Element aufgeklebte Dichtung verschlossen bzw. freigegeben.
1c	O-Ring 2	dichtet zwischen Gehäuse und Ventildeckel.
1d	Sechs M 2-Schrauben	verbinden das Gehäuse mit dem Ventildeckel. Durch drei Schrauben wird der Deckel mit dem Gehäuse befestigt. Die anderen drei Schrauben benötigt man, um den Abstand zwischen Dichtung und Düse festzulegen.
2a	Elektrische Durchführung	Spannungsversorgung.
2b	O-Ring 1	dichtet zwischen dem Gehäuse und der elektrischen Durchführung.
2c	Keramikring	isoliert die elektrische Durchführung gegen das Gehäuse.
2d	Degussit-Ring	isoliert die elektrische Durchführung und das Kontaktblech vom Gehäuse.

2e	Kontaktblech	Spannungsversorgung.
2f	M 1.7-Mutter	befestigt den elektrischen Anschluß an das Gehäuse.
3a	Piezo-Element mit Dichtung	aktives Element; zwei miteinander verklebte PXE 5-Platten (12 * 10 mm), die gegensinnig polarisiert sind.
3b	Teflon	isoliert das Piezo-Element und Kontaktblech von der Klemmhalterung
3c	Klemmhalterung mit Silikonstreifen	Halterung des Piezo-Elements. Der Silikonstreifen sorgt dafür, daß das Piezo-Element in seiner justierten Lage verbleibt.
3d	Zwei M 1.7-Senkkopfschrauben	verbinden die Klemmhalterung mit dem Gehäuse.

1.2 Das Funktionsprinzip des gepulsten Ventils:

Beim Anlegen einer Spannung dehnt sich durch den inversen Piezoeffekt eine der beiden Platten des bimorphen Piezo-Elementes aus, während sich die andere zusammenzieht.

Das Piezo-Element verbiegt sich unter dem Einfluß der Spannung aus seiner Ruhelage und gibt bei einer positiven Ansteuerspannung einen Spalt zwischen Dichtung und Düsenöffnung frei: Das Ventil ist geöffnet.

1.3 Anwendungsbereiche

Während des Expansionsvorgangs aus dem Vorratsbehälter in den Rezipienten kühlen sich die Moleküle in einem Überschallstrahl (supersonic beam) ab. Ein Teil der thermischen Energie des Gases wird dabei durch Molekülstöße in die gerichtete kinetische Energie transferiert. Durch die Abkühlung innerer Freiheitsgrade erhält man einen nahezu monoenergetischen Strahl hoher Dichte. Düsenstrahlen sind generell für die Spektroskopie, in Streuexperimenten und in der Clusterphysik von hoher Bedeutung. Je nach Wahl der experimentellen Bedingungen kann man :

- 1) freie kalte Moleküle oder
- 2) Cluster erzeugen.

Die Kombination von Laserspektroskopie mit Molekularstrahltechniken bietet eine Reihe interessanter Anwendungsmöglichkeiten wie die :

- 1) Untersuchung elastischer, inelastischer und reaktiver Stoßprozesse und das
- 2) Studium der Wechselwirkung von Atomen und Molekülen mit Festkörperoberflächen.

Weiterhin läßt sich das gepulste Ventil als schnell regelbares Dosierventil einsetzen. Im Zusammenhang mit Speicherexperimenten kann es zum schnellen Ein- und Ausschalten eines Gaseinlasses eingesetzt werden. Dabei werden die Zeitkonstanten in erster Linie durch Volumina, Leitwerte und Pumpgeschwindigkeiten bestimmt und nicht durch die Ansprechzeit des Ventils.

2. Die Dichtungen und das piezoelektrische Element

2.1 Das Dichtungsmaterial

Insgesamt wurden drei verschiedene Dichtungsmaterialien eingesetzt:

- 1) Perbunan: Acrylnitril-Butadien-Kautschuk (NBR)
Der thermische Anwendungsbereich liegt bei $T = -30^{\circ}$ bis 150° C
- 2) Silikon-Kautschuke: (Phenyl-)Vinyl-Methyl-Polysiloxan (PVMQ bzw. VMQ) sind thermisch beständig und kälteflexibel
Der thermische Anwendungsbereich liegt bei $T = -60^{\circ}$ bis 200° C
- 3) Viton: Fluor-Kautschuk(FKM)
Der thermischer Anwendungsbereich liegt bei $T = -25^{\circ}$ bis 200° C
[Fre]

Als Dichtungsmaterial sollte man nur Plattenmaterial der Stärke 1 mm verwenden, aus denen man die Einzeldichtung ausstanzt. Ein Durchmesser von 3 mm hat sich für die Dichtung bewährt, da diese Größe eine ausreichende Toleranz für die Position der Dichtung auf dem Piezo-Element zuläßt. Je glatter die Dichtfläche ist, um so leichter läßt sich das Ventil später einjustieren. Eine aufgerauhte Dichtoberfläche führt dazu, daß das Piezo-Element zum Abdichten mechanisch vorgespannt sein muß. Der maximal erreichbare Teilchenfluß wird begrenzt, da nur ein Teil des gesamt verfügbaren Hubs der Piezokeramik für den Öffnungsspalt des Ventils bereitsteht. Aus der Abbildung 2 entnimmt man, daß man mit dem Ventil, dessen Dichtmaterial Perbunan ist, einen deutlich geringeren Teilchenfluß erreicht als mit der Silikon gedichteten Ausführung. Der Unterschied läßt sich erklären, wenn man die Oberflächenbeschaffenheit der beiden Dichtmaterialien vergleicht. Während das Silikon eine weitgehend glatte homogene Oberfläche besitzt, ist die Fläche des verwendeten Dichtmaterials Perbunan aufgerauht.

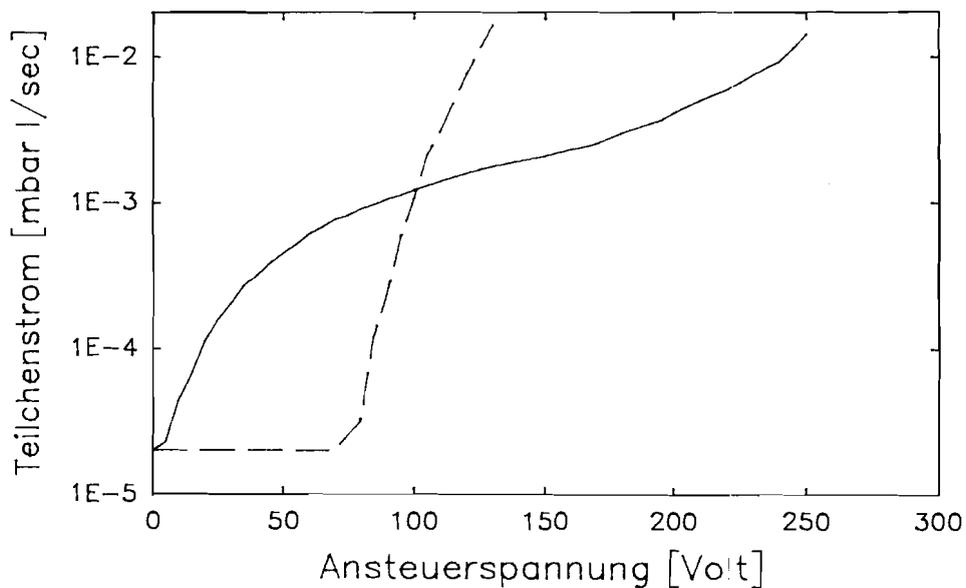


Abb. 2: Teilchenstrom in Abhängigkeit von der Ansteuerspannung für zwei verschiedene Dichtmaterialien bei statischen Betriebsbedingungen (durchgezogene Kurve: Perbunan, gestrichelte Linie: Silikon)

Weitere Tests mit Perbunan, Viton und Silikon ergeben, daß Perbunan und Viton als Dichtmaterial HV- und Silikon UHV-gesegnet ist. Experimente mit NH_3 belegen, daß der Einsatz aggressiver Gase zu Betriebsschwierigkeiten wie vermindertem Gasfluß führen kann. Diese Probleme können sowohl in den Materialeigenschaften des Piezo-Elementes als auch des Dichtungsmaterials begründet sein.

2.2 Das Piezo-Element

Die eingesetzten Piezo-Bimorph-Platten bestehen aus dem Werkstoff PXE 5 [Val 86], dessen Grundmaterial Bleititanate (PbTiO_3) bzw. Blei-Zirkonate (PbZrO_3) sind. Hinzu kommen Zusätze wie MnO_2 und La_2O_3 , die meist in piezoelektrischen Materialien zu finden sind [Lan 86]. Der Werkstoff PXE 5 besitzt einen großen elektromechanischen Kopplungsfaktor $k = 0.69$, d.h. 69% der eingegebenen elektrischen Energie werden in mechanische Deformationsenergie umgesetzt.

Das Piezo-Element besteht aus zwei miteinander verklebten Platten, die gegensinnig polarisiert und mit Nickelelektroden versehen sind.

Da das Piezo-Element sehr spröde und daher bruchanfällig ist, muß man mit ihm sorgfältig umgehen. Bevor man ein neues Element in Betrieb nimmt, muß es auf Beschädigungen hin untersucht werden (Mikroskop).

Ein wichtiges diagnostisches Hilfsmittel ist dabei das Schwingungsverhalten des Elementes: Dazu setzt man das aktive Element – wie unter 3.1) und 3.2) beschrieben – provisorisch in das Ventil ein. An die elektrische Durchführung schließt man einen Rechteckpulsgenerator an, dessen Frequenz, Pulsdauer und Amplitude ungefähr auf folgende Richtwerte abzustimmen sind:

Frequenz: 100 Hz

Amplitude (Ansteuerspannung): 100 Volt

Pulsdauer: 100 μsec

Die an dem Element anliegende Spannung beobachtet man mit einem Spannungsteiler auf einem Oszilloskop. Abbildung IX 3 und IX 4 zeigen Oszillogramme einjustierter Ventile (nähere Einzelheiten siehe Punkt 4.3)). Die Grundschwingung eines voll funktionsfähigen Elementes liegt bei 3.6 kHz (Periode: 280 μsec), die Oberschwingung erreicht etwa 25 kHz (Periode: 40 μsec).

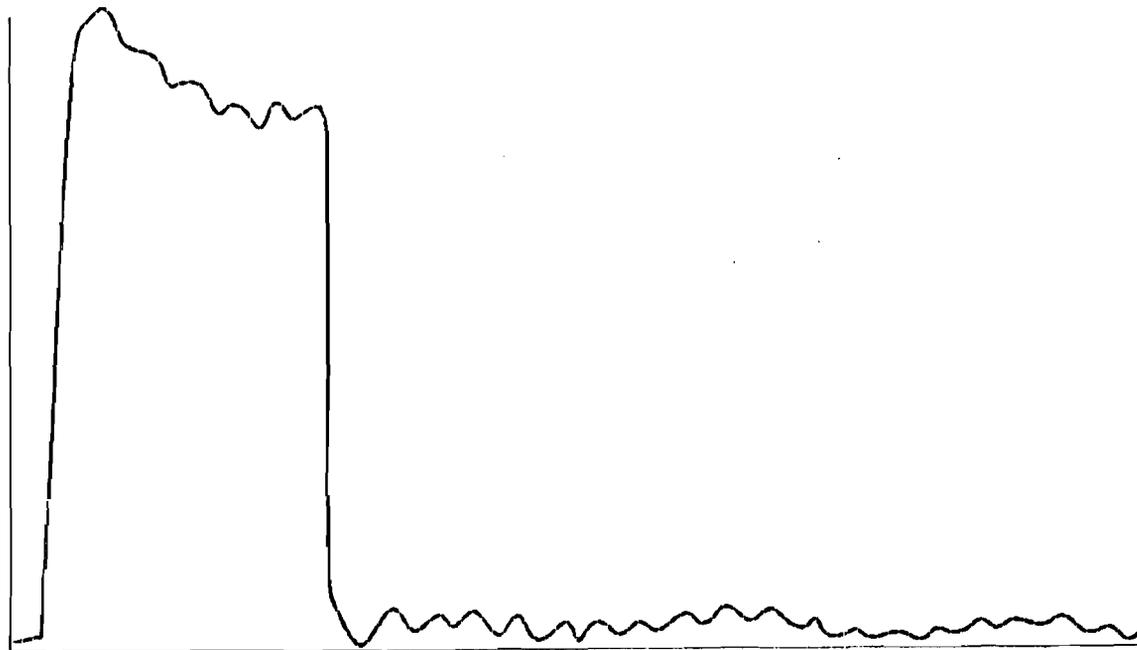
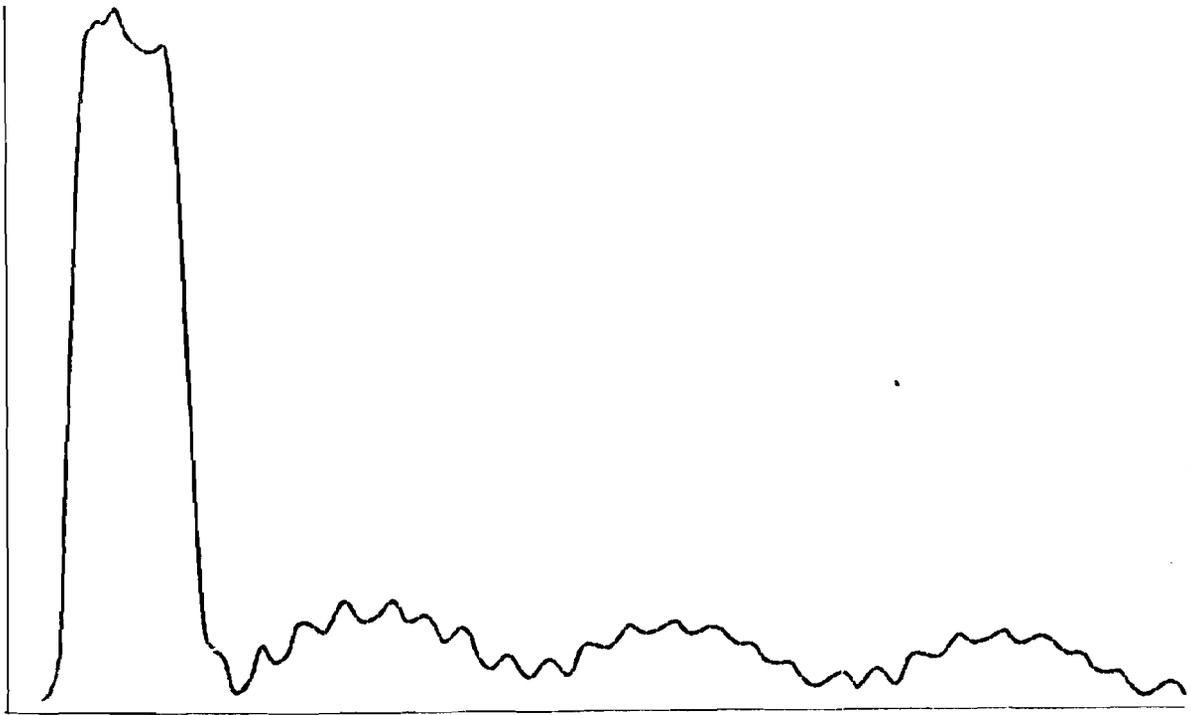


Abb. 3 und 4: Schwingungsverhalten des Piezo-Elements bei einer Ansteuerpulslänge von $120 \mu\text{s}$ bzw. $260 \mu\text{s}$. In der oberen Abbildung erkennt man deutlich die Grundschiwingung mit einer Frequenz von 3.6 kHz und die Oberschiwingung mit 26 kHz . Wenn die Ansteuerpulslänge im Bereich der Periodendauer der Resonanz ($280 \mu\text{s}$) liegt, treten keine Nachschwinger mit der Grundfrequenz auf.

Für die Serien-Bimorph-Platte ergeben sich nach der Formel [Val 86]:

$$\nu(\text{kHz}) = 400 \cdot \frac{d \text{ (mm)}}{l^2 \text{ (mm}^2\text{)}} \quad (1)$$

d: Dicke des Piezo-Elementes

l: freie Länge des Piezo-Elementes

folgende Werte für die Grund- und Oberschwingung:

Grundschiwingung: $\nu = 3.7 \text{ kHz}$ mit $d = 0.6 \text{ mm}$ und $l = 8 \text{ mm}$

Oberschwiwingung: $\nu = 26.7 \text{ kHz}$ mit $d = 0.6 \text{ mm}$ und $l = 3 \text{ mm}$

Um einem möglichen Bruch des Piezo-Elementes im späteren Betrieb vorzubeugen, muß unbedingt darauf geachtet werden, daß die Auflagefläche des Elementes im Gehäuse entgratet ist.

Generell läßt sich die Piezo-Keramik durch die äußeren Faktoren Temperatur, Feldstärke und mechanische Spannung ganz oder teilweise depolarisieren:

Die speziell für den eingesetzten Werkstoff PXE 5 geltenden kritischen Werte liegen bei [Val 86]:

- 1) Maximaltemperatur (Curie-Temperatur): $\vartheta_c = 285^\circ \text{ C}$
- 2) Maximale elektrische Feldstärke: $E = 300 \frac{\text{V}}{\text{mm}}$
- 3) Maximale mechanische Spannung: $P = 2.5 \text{ MPa}$

2.3 Das Verkleben der Dichtung

Zum Verkleben der Dichtung auf dem aktiven Element kann man einen beliebigen Zweikomponentenklebstoff verwenden (z.B. Uhu-Plus oder auch Torr-Seal als HV-Klebstoff). Wenn man sicher gehen will, daß der Klebstoff später nicht ausgast, sollte man auf teure HV-Klebstoffe zurückgreifen. Bisher hat sich aber der Einsatz herkömmlicher Klebstoffe gut bewährt.

Das Piezo-Element muß vor dem Aufkleben der Dichtung fett- und staubfrei sein. Daher ist die Oberfläche zuerst mit Äthanol zu reinigen. Staubpartikel werden mit Stickstoff abgeblasen.

Wenn man man den Klebstoff so weit erwärmt, daß er dünnflüssig ist und auf der piezoelektrischen Keramik gut verläuft, dann kann man durch Zusammenpressen von Dichtung und Element (z.B.: zwischen zwei planen Scheiben) die Gefahr vermeiden, Luftblasen einzuschließen. Im Vakuum können solche Lufteinschlüsse durch Expansion das Öffnen der Düse verhindern. Will man den Klebevorgang durch Heizen beschleunigen, so ist darauf zu achten, daß das Element nicht längere Zeit über 200° C erhitzt wird, da sonst eine teilweise Depolarisation einsetzt. Eine Abschätzung für die thermischen Verluste der ferroelektrischen Eigenschaften liefern die vom Hersteller angegebenen Werte über das Temperaturverhalten des Kopplungsfaktors: Eine Abnahme des Kopplungsfaktors k um 10% (20%) tritt bei: 170° C (210°C) ein.

3 Zusammenbau und Justierung

Beim Zusammenschrauben ist darauf zu achten, daß Ventildeckel und Gehäuse planparallel zueinander stehen. Eine schief aufgebrachte Dichtung erfordert beim Einjustieren eine wesentlich höhere mechanische Vorspannung, die einerseits die punktuelle Belastung des Piezo-Elementes und damit die Wahrscheinlichkeit für einen Bruch an der Einspannkante erhöht und andererseits den erreichbaren Gasfluß einschränkt, da der maximale Teilchenfluß bei festem Stagnationsdruck durch den Hub des Piezo-Elementes begrenzt wird.

Bevor man das Ventil zusammenbaut, müssen die Edelstahlteile sorgfältig im Ultraschallbad mit einer RBS-Lösung und mit Äthanol gereinigt werden. Der Degussit-Ring wird ausgeglüht, damit die gespeicherte Feuchtigkeit entweicht. Das Piezo-Element reibt man mit Äthanol ab.

Der Aufbau der Einzelteile auf das Gehäuse gliedert sich in zwei Schritte:

- 3.1) Der Zusammenbau des elektrischen Anschlusses
- 3.2) Das Einsetzen des Piezo-Elementes

3.1 Der Zusammenbau des elektrischen Anschlusses

Die elektrische Durchführung, die aus den Teilen 2a bis 2f besteht, wird wie folgt montiert:

Zuerst legt man den Keramikring (2c) und inwandig den O-Ring 1 (2b) in die Nut, die sich auf der Rückseite des Ventilgehäuses befindet. Anschließend steckt man die elektrische Durchführung (2a) durch die Gehäuseöffnung. Um den elektrischen Anschluß einerseits gegen das Gehäuse zu isolieren und andererseits radial zu zentrieren, verwendet man einen Degussit-Ring (2d), der die Durchführung umfaßt und in der Nut auf der Innenseite des Gehäuses sitzt. Über den Degussit-Ring legt man das Kupfer-Kontaktblech (2e) und verschraubt es (2f) mit der Durchführung (2a). Diese Verschraubung erfüllt zwei Funktionen: einerseits positioniert sie die elektrische Durchführung und andererseits dient sie dazu, Durchführung und Gehäuse mit dem O-Ring 1 (2b) abzudichten. Daher ist es notwendig, die Durchführung fest auf dem Keramikring aufsitzen zu lassen.

3.2 Das Einsetzen des Piezo-Elementes

Im zweiten Schritt setzt man die Bauteile, die die Beweglichkeit des aktiven Elementes festlegen, zusammen (3a bis 3d).

Zuerst schiebt man zwischen Gehäuse und Kupfer-Kontaktblech das Piezo-Element mit der aufgeklebten Dichtung (3a). Im Anschluß daran setzt man die Teflon-Isolierung (3b) und die Klemmhalterung (3c) auf das Kontaktblech. Mit zwei M 1.7-Senkkopfschrauben (3d) wird die Halterung mit dem Gehäuse befestigt.

Nachdem man den O-Ring 2 (1c) in die große Nut des Gehäuses gelegt hat, schraubt man dann den Ventildeckel (1b) auf das Gehäuse (1a).

3.3 Die Justierung

Um das Ventil einzujustieren, benötigt man einen Vorvakuumstand und ein 300 Volt-Netzgerät.

Die Einzelteile des Ventils sind jetzt, wie unter 3.1) und 3.2) beschrieben, zusammengesetzt. Einen Überblick liefert die Abbildung IX 1.

Das Ventil läßt man düsenseitig von einer Vorvakuumpumpe ansaugen. Dazu kann man einen NW 10-O-Ring verwenden, dessen Stützring einseitig abgedreht ist.

Das Ventil wird jetzt mit den sechs M 2-Schrauben einjustiert.

Für das weitere Verständnis ist es wichtig, zwischen den drei Konter- und den drei Befestigungsschrauben zu unterscheiden.

Die Befestigungsschrauben dienen dazu, den O-Ring zwischen Deckel und Gehäuse soweit zusammenzudrücken, daß das Ventil vakuumdicht abschließt. In dieser Grobjustierung zieht man die Befestigungsschrauben gleichmäßig so weit an, bis die mit dem aktiven Element verklebte Dichtung auf der Düsenöffnung aufsitzt und das Ventil geschlossen wird: der Druck auf der Vorpumpenanzeige beginnt zu fallen.

Hat man den für die Vorpumpe typischen Enddruck erreicht, dann geht man zur Feinjustierung mit Hilfe der Konterschrauben über. Im ersten Anlauf werden die Befestigungsschrauben jeweils eine halbe Umdrehung weiter gedreht als notwendig ist, um das Ventil vakuumdicht zu verschließen. Die drei Konterschrauben zieht man im folgenden so stark an, daß bei einer an der Durchführung anliegenden positiven Spannung von etwa 60 Volt ein Druckanstieg beobachtet wird. Nimmt man die Spannung zurück, so muß die Druckanzeige wieder auf den typischen Endwert fallen. Falls sich das Ventil durch mäßiges Anziehen der Konterschrauben nicht öffnen läßt, muß man die Befestigungsschrauben etwas lockern (1/4 Umdrehung). Der Justiervorgang wird solange wiederholt, bis die Düse bei den erwähnten 60 Volt Gleichspannung öffnet und den nachstehenden Teilchenfluß bei 200 Volt Gleichspannung erreicht.

Leitwert im offenen Zustand : $1.30 \frac{\text{mbar l}}{\text{sec}}$

(200 Volt Gleichspannung, 0.3 mm Düsendurchmesser bei 1 bar Eingangsdruck).

Erzielt man trotz mehrfacher Feineinstellung der Befestigungs- und Konterschrauben nicht das gewünschte Öffnungsverhalten, dann kann der Fehler entweder beim:

- 1) Piezo-Element,
- 2) der aufgeklebten Dichtung oder
- 3) beim möglicherweise verschmutzten Vorpumpenstand liegen.

Unebene Dichtflächen bzw. Staubpartikel bewirken, daß sich das Ventil nur mit hohen Vorspannungen schließen läßt. Ein schief eingesetztes Piezo-Element verhindert, daß man den maximal möglichen Teilchenfluß erreicht.

Im nächsten Schritt sollte man daher kontrollieren, ob das Ventil über den O-Ring 1 bzw. O-Ring 2 leckt. Dazu wird der eingeschweißte Gasanschluß gedichtet. Das Ventil betreibt man auf dem Vorvakuumstand mit 200 Volt Gleichspannung. Wenn der O-Ring 1 zwischen dem Gehäuse und der elektrischen Durchführung und O-Ring 2 zwischen Gehäuse und Deckel dichten, dann muß sich nach dem Abpumpen des Gasvolumens in der Düse wiederum der typische Enddruck des Vorvakuumstandes einstellen. Wird der Wert überschritten, dann besitzt das Ventil ein Leck.

Als mögliche Ursachen seien genannt:

- 1) Der Piezo-Deckel ist so schlecht poliert, daß durch noch vorhandene Riefen kleine Kanäle zwischen dem Ventilvolumen und dem Außenbereich entstehen, die der O-Ring 1 nicht abdichten kann.
- 2) Die Mutter (2f), mit der man den O-Ring 2 zwischen der Durchführung und dem Gehäuse zusammendrückt, ist nicht fest genug angezogen. Außerdem sollte man sich vergewissern, ob die Dichtfläche beschädigt ist.
- 3) Die eingesetzten O-Ringe können porös sein.

4 Eigenschaften des Ventils

4.1 Betriebsarten

4.1.1 Ansteuerung bei Resonanzbetrieb

Betreibt man das Ventil in Resonanz ($\nu_R = 3.6 \text{ kHz}$), so genügt eine Ansteuerspannung von etwa 20 Volt, um maximalen Teilchenfluß zu erreichen.

4.1.2 Ansteuerung durch kurze Pulse

Das Ventil kann durch einen kurzen Rechteckpuls angesteuert werden. Je nach Einstufung öffnet das Ventil bis hinab zu einer Ansteuerpulslänge von 8 μsec .

4.2 Der dynamische Betrieb

In diesem Abschnitt werden nacheinander die für das Öffnungsverhalten des Ventils relevanten Parameter diskutiert. Dazu gehören:

- 1) die Länge des Ansteuerpulses
- 2) die Höhe der angelegten Vorspannung und
- 3) der Einfluß des Stagnationsdruckes.

Für das Verständnis des Ventils sind die beiden Größen Vorspannung und Ansteuerpulslänge von entscheidender Bedeutung. Das zeitliche Profil des Gaspulses läßt sich mit einem Elektronenstrahl oder einem Laser abtasten, wenn man das Delay zwischen dem Ansteuersignal für das Ventil und dem Elektronen- bzw. Laserstrahl durch eine variable Verzögerungseinheit verfährt. Zu fest vorgewählten Zeitpunkten wird die Ionenintensität aufgezeichnet.

4.2.1 Die Ansteuerpulslänge

Das Öffnungsverhalten des gepulsten Ventils läßt sich mit der Methode der Resonanten Multiphoton-Ionisation bestimmen. Das hohe räumliche und zeitliche Auflösungsvermögen des fokussierten Laserstrahls liefert ein direktes Bild von dem Schwingungsverhalten des Piezo-Elementes.

Die nachfolgenden Abbildungen 5 bis 10 zeigen den zeitlichen Intensitätsverlauf des gemessenen Ionensignals, d.h. das Schwingungsverhalten des aktiven Elementes, in Abhängigkeit von der Ansteuerpulslänge.

Der Zeitnullpunkt ist jeweils die ansteigende Flanke des Rechteckpulses, mit dem das Ventil angesteuert wird. Bei kurzen Steuersignalen (10–35 μsec) öffnet das Ventil etwa 90 μsec , nachdem der Puls eingeschaltet ist. Im Fall kurzer Ansteuersignale zeigt das zeitliche Öffnungsverhalten zwei deutlich voneinander separierte Gaspulse, die in einem Abstand von 40 μsec – dies entspricht der Oberschwingung von 25 kHz – aufeinander folgen. Unter diesen Betriebsbedingungen bestimmt die Oberschwingung des Piezo-Elementes das Öffnungsverhalten des Ventils.

Die erreichte minimale Halbwertsbreite (FWHM) des Gaspulses liegt bei 8 bis 10 μsec (Abbildung 5).

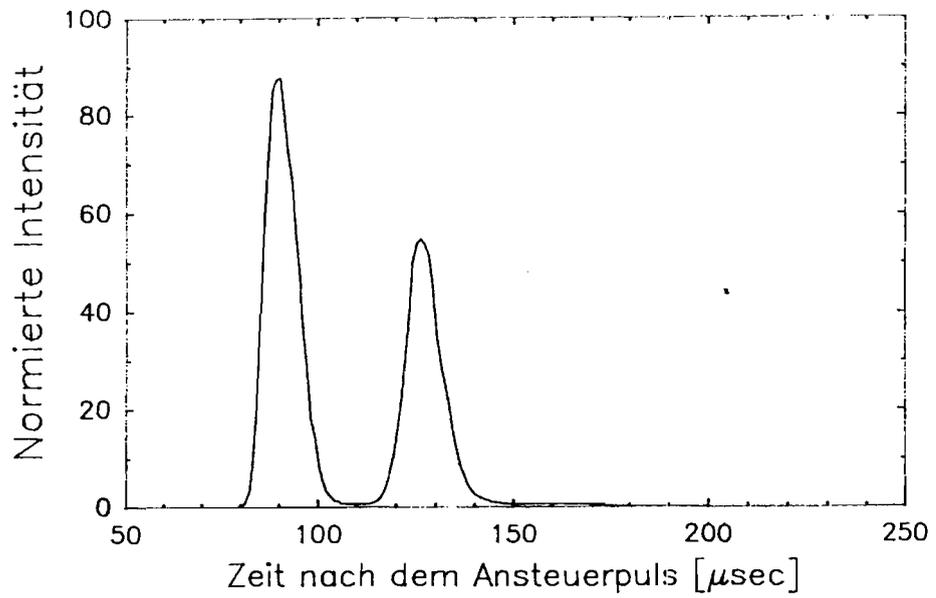


Abb. 5: Zeitlicher Verlauf des Gaspulses bei einer Ansteuerpulslänge von 10 μsec . Betriebswerte: Stagnationsdruck 2 bar, Ansteuerspannung: 240 Volt, Vorspannung: -50 Volt.

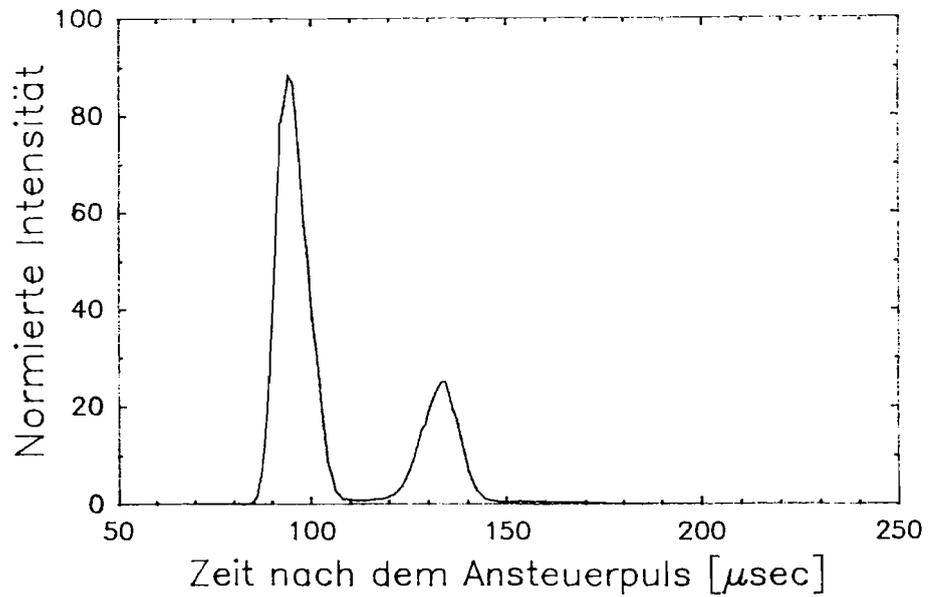


Abb.6 Zeitlicher Verlauf des Gaspulses bei einer Ansteuerpulslänge von 20 μsec . Betriebswerte: Stagnationsdruck: 2 bar, Ansteuerspannung: 240 Volt, Vorspannung: -50 Volt.

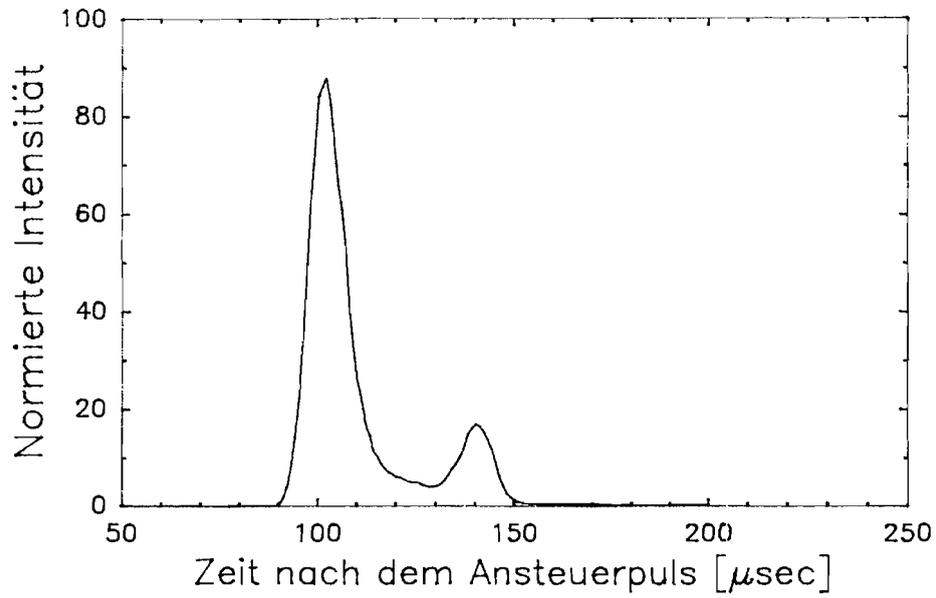


Abb. 7 Zeitlicher Verlauf des Gaspulses bei einer Ansteuerpulslänge von 30 μsec . Betriebswerte: Stagnationsdruck: 2 bar, Ansteuerspannung: 160 Volt, Vorspannung: -50 Volt.

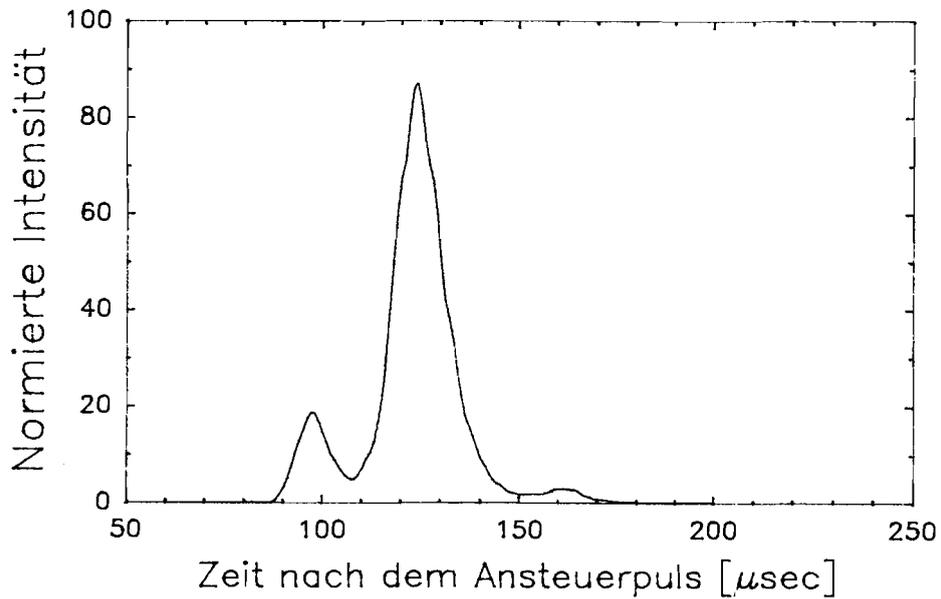


Abb. 8: Zeitlicher Verlauf des Gaspulses bei einer Ansteuerpulslänge von 50 μsec . Betriebswerte: Stagnationsdruck: 2 bar, Ansteuerspannung: 100 Volt, Vorspannung: -50 Volt.

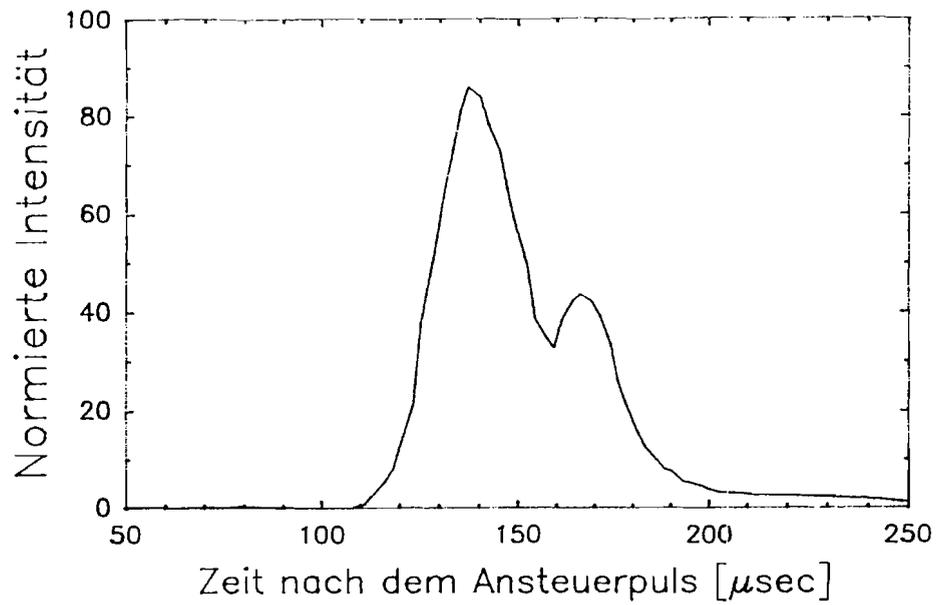


Abb. 9: Zeitlicher Verlauf des Gaspulses bei einer Ansteuerpulslänge von 100 μsec . Betriebswerte: Stagnationsdruck: 2 bar, Ansteuerspannung: 50 Volt, Vorspannung: -50 Volt.

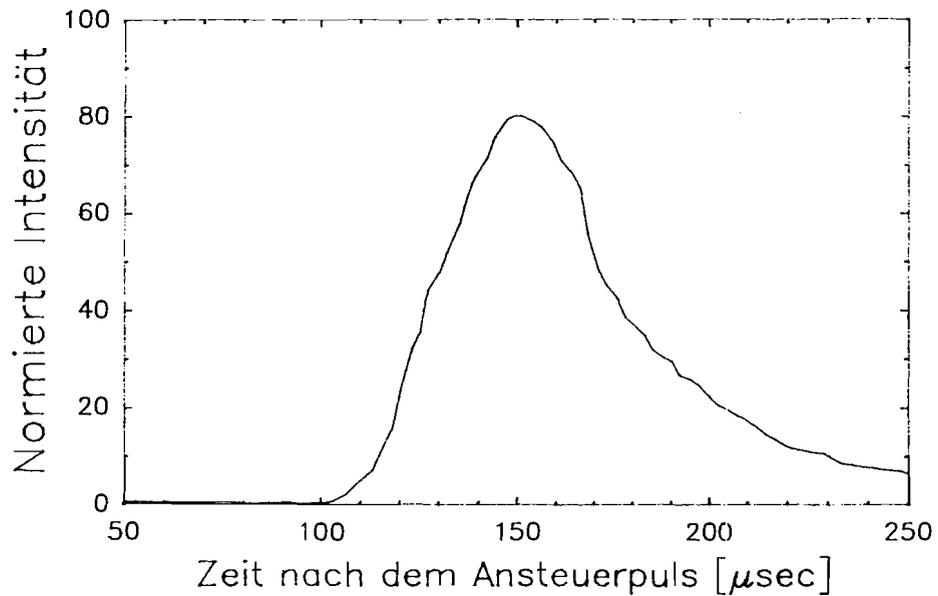


Abb. 10: Zeitlicher Verlauf des Gaspulses bei einer Ansteuerpulslänge von 270 μsec . Betriebswerte: Stagnationsdruck: 2 bar, Ansteuerspannung: 35 Volt, Vorspannung: -50 Volt.

Verlängert man den Ansteuerpuls, so erkennt man, daß sich der Intensitätsverlauf auf zweierlei Arten ändert:

- 1) Das Ventil benötigt eine längere Zeit, bis es öffnet. Bei einer Ansteuerpulslänge von $100 \mu\text{sec}$ liegt der Rechteckpuls bereits $110 \mu\text{sec}$ vor dem Öffnen des Ventils an.
- 2) Die anfangs gut aufgelöste Oberwellenstruktur wird zerstört. Die Halbwertsbreite des Gaspulses nimmt Werte zwischen 25 bis $40 \mu\text{sec}$ an.

Qualitativ läßt sich das Schwingungsverhalten des aktiven Elements als komplexe Überlagerung von Grund- und Oberschwingung verstehen.

Neben der Oberwellenstruktur zeigt das Öffnungsverhalten auch eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Grundschwingung. Bei Ansteuerpulsen im Bereich von etwa $120 \mu\text{sec}$ erhält man abermals einen doppelten Gaspuls, der – zeitlich $280 \mu\text{sec}$ voneinander getrennt – auf eine zweite angeschwungene Grundwelle zurückzuführen ist.

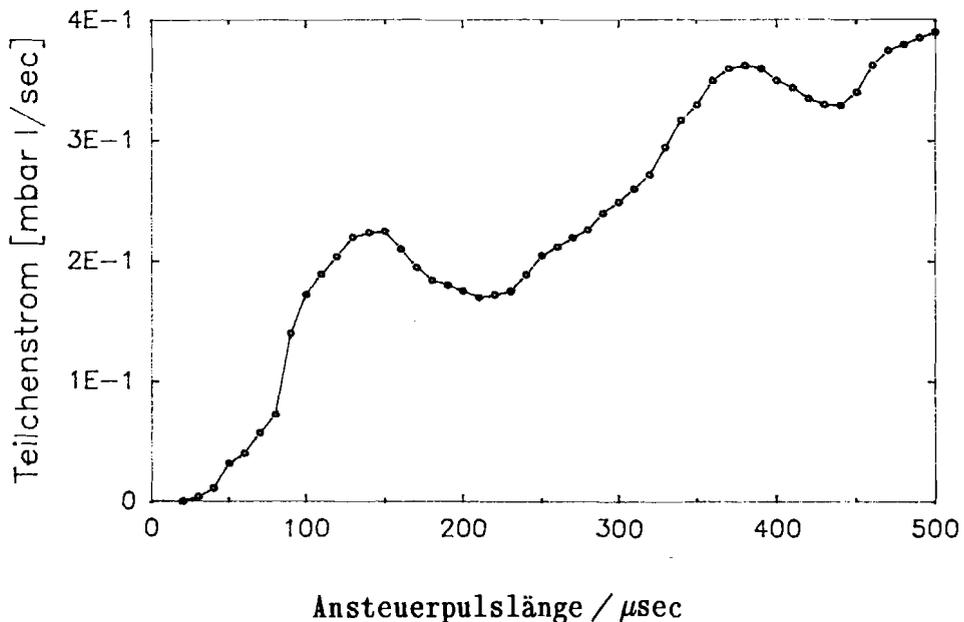


Abb. 11: Teilchenfluß in Abhängigkeit von der Ansteuerpulslänge. Eine Drucküberhöhung beobachtet man bei den Ansteuerpulslängen, die ganzzahligen Vielfachen der halben Grundperiode ($260 \mu\text{sec}$) entsprechen.

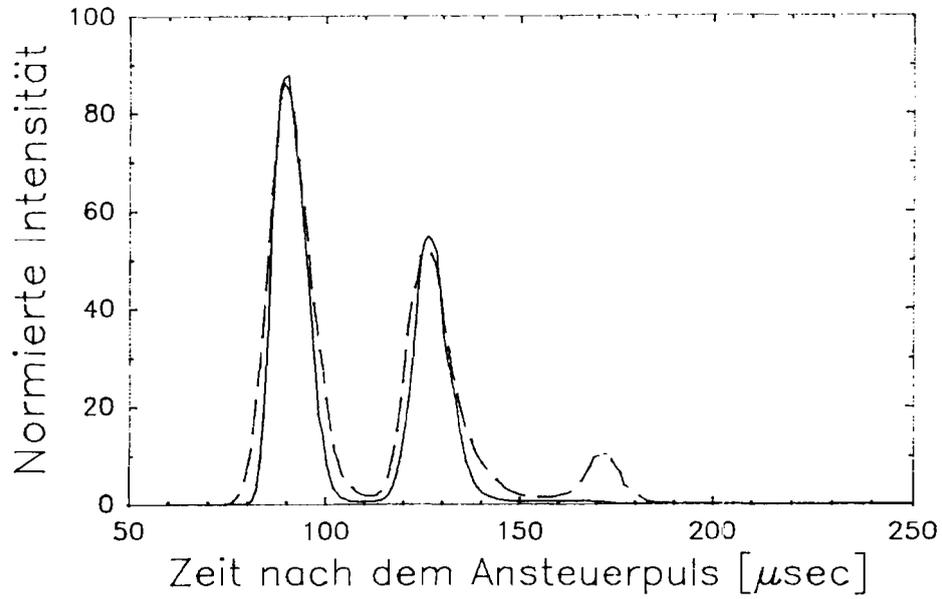


Abb. 12: Einfluß der Vorspannung auf das zeitliche Öffnungsverhalten des Ventils (durchgezogene Kurve: -50 Volt Vorspannung, gestrichelte Kurve: keine Vorspannung).

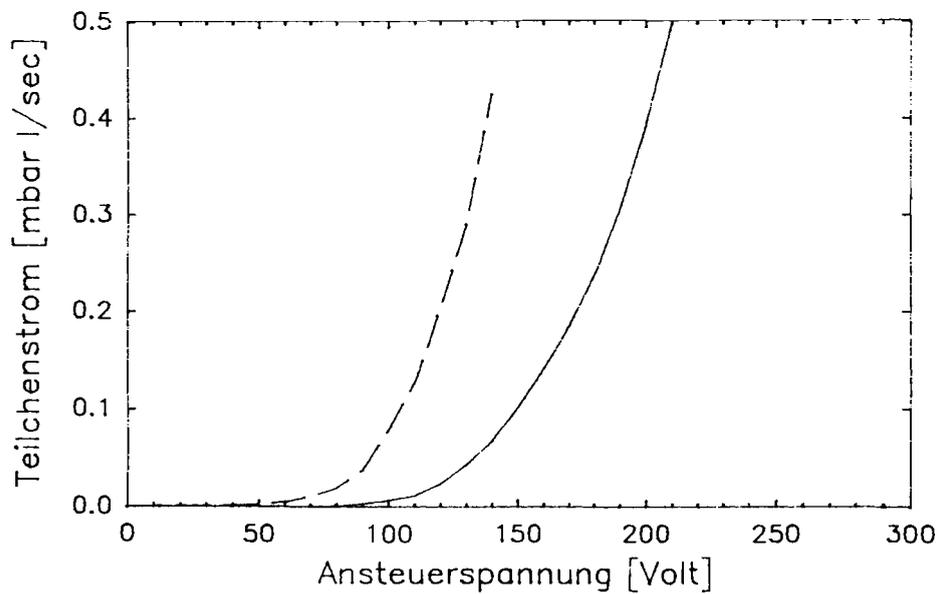


Abb. 13: Einfluß der Vorspannung auf den Teilchenfluß (gestrichelte Kurve: -100 Volt Vorspannung, durchgezogene Kurve: keine Vorspannung).

Der Einfluß der Grundschwingung auf das Öffnungsverhalten des Ventils ist so stark ausgeprägt, daß man ihn bereits mit dem Ionisationsmanometer aufzeichnen kann (Abb. IX 11). Dazu bestimmt man den Teilchenfluß in Abhängigkeit von der Ansteuerpulslänge. Im Druckverlauf zeigen sich relative Maxima, die jeweils in einem Abstand der halben Grundperiode von 120 bis 130 μsec zueinander liegen. Das erste relative Maximum wird bei einer Ansteuerpulslänge von 120 – 140 μsec angenommen. Die Ursache für diesen überhöhten Teilchenfluß liegt darin, daß das Ventil bei der halben Grundperiode maximal ausschlagen kann, so daß die Öffnungsbedingungen optimal sind.

4.2.2 Die Vorspannung

Die negative Ansteuerspannung, kurz Vorspannung genannt, erfüllt zwei Funktionen:

- 1) Die Piezo–Keramik wird durch die Vorspannung gegen die Düse gepreßt und garantiert so ein sicheres Schließen des Ventils.
- 2) Der erreichbare Hub des aktiven Elements und damit der Teilchenfluß nimmt bei anliegender Vorspannung zu. Darüber hinaus stellt man fest, daß sie die Oberwellenstruktur beeinflusst.

Aus der Abbildung IX 12 entnimmt man, daß bereits eine geringe Vorspannung von –50 Volt ausreicht, um das Öffnungsverhalten des Ventils zu modifizieren: Während bei anliegender Vorspannung zwei Oberwellen sichtbar sind, erkennt man bei fehlender Vorspannung, daß zusätzliche Nachschwinger auftreten.

Neben der Schwingungsstruktur kann die Vorspannung auch den Teilchenfluß aus dem Ventil beeinflussen. Sie führt bei gleichbleibender Ansteuerspannung zu einem vergrößerten Hub des aktiven Elements. Daher ist zu erwarten, daß sich der Teilchenfluß bei Anlegen einer Vorspannung erhöht. Die Abbildung VI 15 zeigt, wie sich der Gasfluß aus dem Ventil in Abhängigkeit von der Ansteuerpulslänge bei zwei fest vorgewählten Vorspannungen (0 Volt, –100 Volt) ändert. Wenn man das Ventil mit –100 Volt betreibt, öffnet es sich bereits bei niedrigeren Ansteuerspannungen und zeigt im direkten Vergleich zur Betriebsart ohne Vorspannung einen erhöhten Teilchenfluß.

4.2.3 Der Teilchenfluß aus dem Ventil

Der Leitwert des Ventils beträgt im offenen Zustand bei 1 bar Eingangsdruck $1.3 \frac{\text{mbar l}}{\text{sec}}$.

Bei Ansteuerspannungen von 200 Volt liegt der effektive Düsendurchmesser des Ventils in der Größenordnung von ca. $50 \mu\text{m}$. Die Teilchendichte in der Düsenöffnung erreicht dann bei moderaten Stagnationsdrücken (1– 5 bar) Werte von 10^{16} bis 10^{17} Teilchen pro cm^3 . Aus der Abbildung IX.14 entnimmt man, daß der Teilchenfluß linear mit dem Stagnationsdruck anwächst.

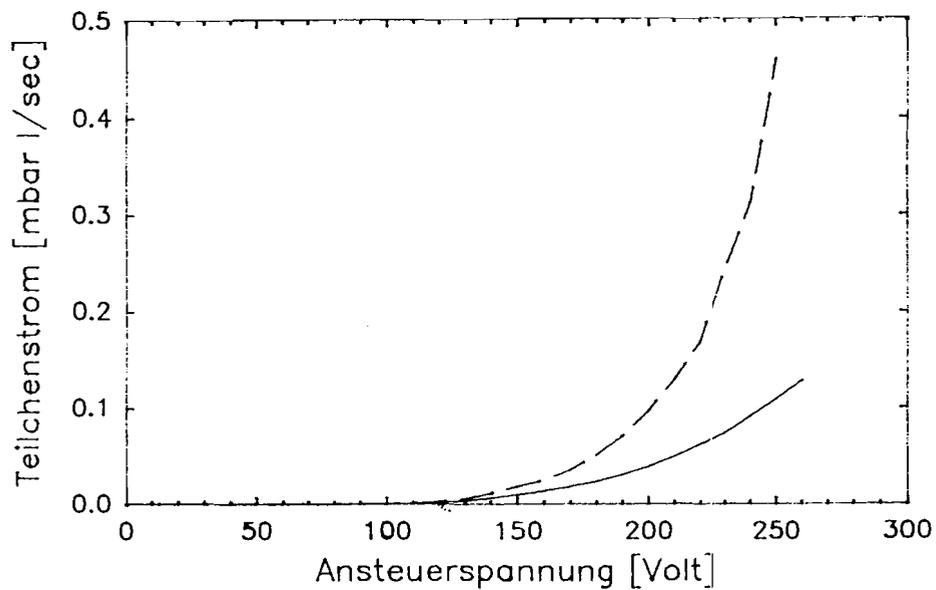


Abb. 14: Teilchenfluß für zwei verschiedene Stagnationsdrücke (gestrichelte Kurve: 4 bar, durchgezogene Kurve: 1 bar)

4.2.4 Dynamische Tests des Piezo-Elements

Die Kombination der beiden dynamischen Größen Frequenzverhalten und Amplitudenverhältnis bieten den bisher zuverlässigsten Test, das Piezo-Plättchen auf seine Funktionsfähigkeit hin zu überprüfen. Für die Frequenzen gelten:

- 1) Grundschiwingung: 3.6 kHz
- 2) Oberschiwingung: 25 kHz

Das Amplitudenverhältnis zeichnet man mit einem Spannungsteiler auf einem Oszilloskop auf. Dabei treten 3 charakteristische Amplituden auf:

- 1) Ansteuerspannung A_s
- 2) Amplitude der Grundschiwingung G_s
- 3) Amplitude der Oberschiwingung O_s

Für eine intakte Piezo-Element gelten die folgenden Beziehungen zwischen den Amplituden:

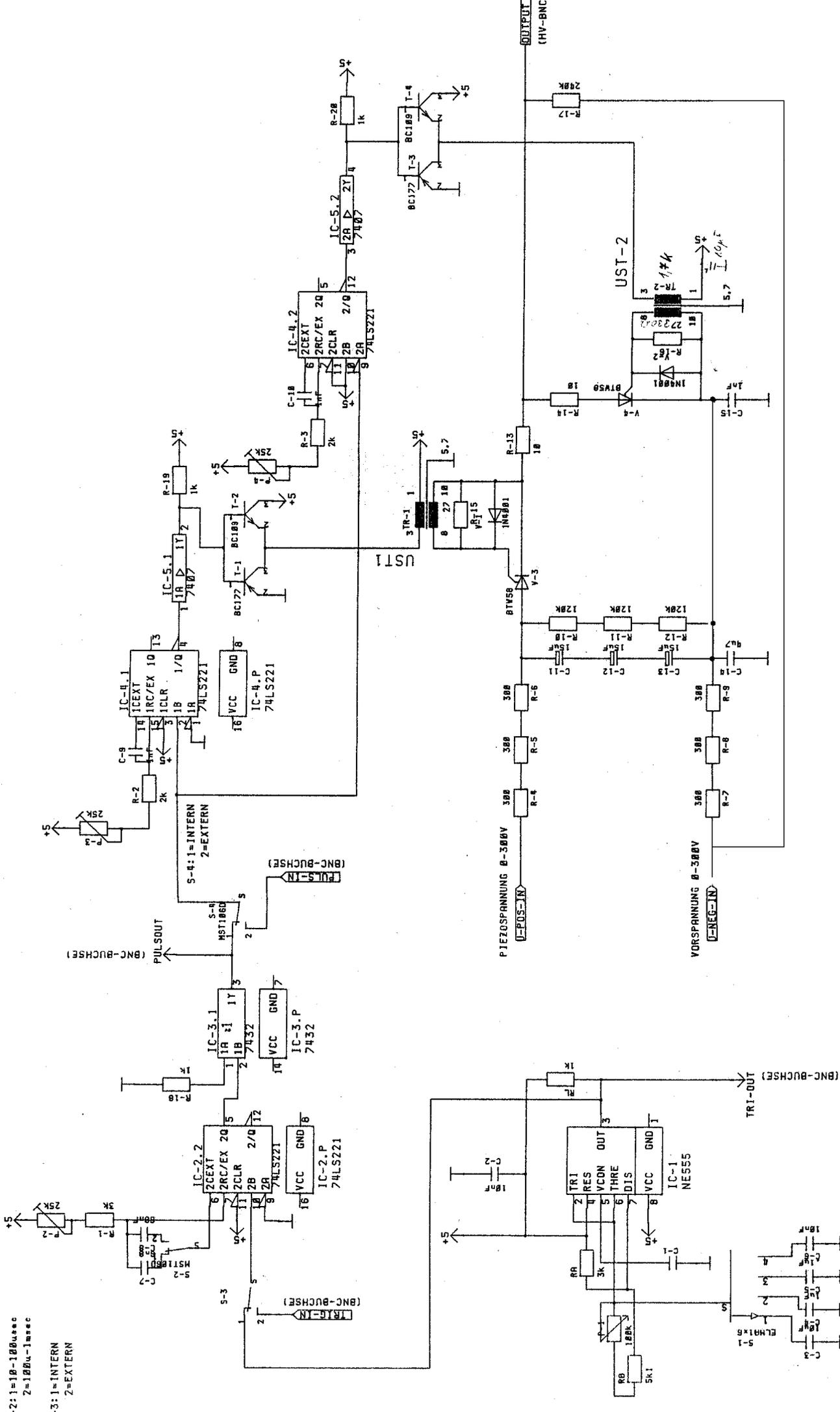
x / y	A_s	$G_{s,min}$	$G_{s,max}$	$O_{s,min}$	$O_{s,max}$
A_s		1 / 15	1 / 5		
$G_{s,min}$	15 / 1		3 / 1		1 / 1
$G_{s,max}$	5 / 1	1 / 3			1 / 3
$O_{s,min}$					10 / 1
$O_{s,max}$		1 / 1	3 / 1	1 / 10	

Die Dämpfung der Grundschiwingung wurde bei einer Ansteuerpulslänge von 120 μ sec Ansteuerpulslänge bestimmt. Nach 15 Grundschiwingungen beträgt die Amplitude noch 30 % der ersten Grundschiwingung.

4.3 Charakteristische Betriebsdaten und Spezifikation

Abmessung: Durchmesser: Höhe :	35 mm 9 mm
zylindrische Bauform	
Gasanschluß:	Mini-Cajon
Werkstoffe: Gehäuse : Dichtungen: Isolation :	Edelstahl (V4A) Perbunan, Viton, Silikon Degussit, Stenan
Aktives Element:	Piezo-Bimorph-Platte: 12 * 10 mm
Öffnungshub: statisch : dynamisch:	30 um 100 um Resonanzüberhöhung
Düsendurchmesser: effektiver Düsendurchmesser:	0.15 bis 0.5 mm kleiner als 150 µm
Leckrate bei geschlossenem Ventil:	kleiner als $10^{-7} \frac{\text{mbar l}}{\text{sec}}$
Leitwert im offenen Zustand bei 1 bar Eingangsdruck (200 Volt, 0.3 mm Duse)	$1.3 \frac{\text{mbar l}}{\text{sec}}$
Repetitionrate:	bis 3.6 kHz
Frequenz: Grundschiwingung: Oberschiwingung :	3.6 kHz 25 kHz
Ansteuerspannung:	maximal: 300 Volt
Typische Ansteuerspannung:	100 bis 200 Volt

Vorspannung:	maximal: - 300 Volt
Typische Vorspannung:	- 50 bis - 100 Volt
Ansteuerpulslänge:	10 bis 270 usec
typische Ansteuerpulslänge:	30 bis 120 usec
Dauer der Öffnungszeit:	10 usec FWHM bei 10 usec Ansteuerpulslänge 25 bis 30 usec FWHM bei 60 usec Ansteuerpulslänge
Stagnationsdruck:	250 mbar bis 10 bar
Temperaturbereich:	220 bis 450 Kelvin
Stagnationsdruck	mehr als 10^9 Schüsse



S-2: 1=10-100µsec
2=100µ-1msec

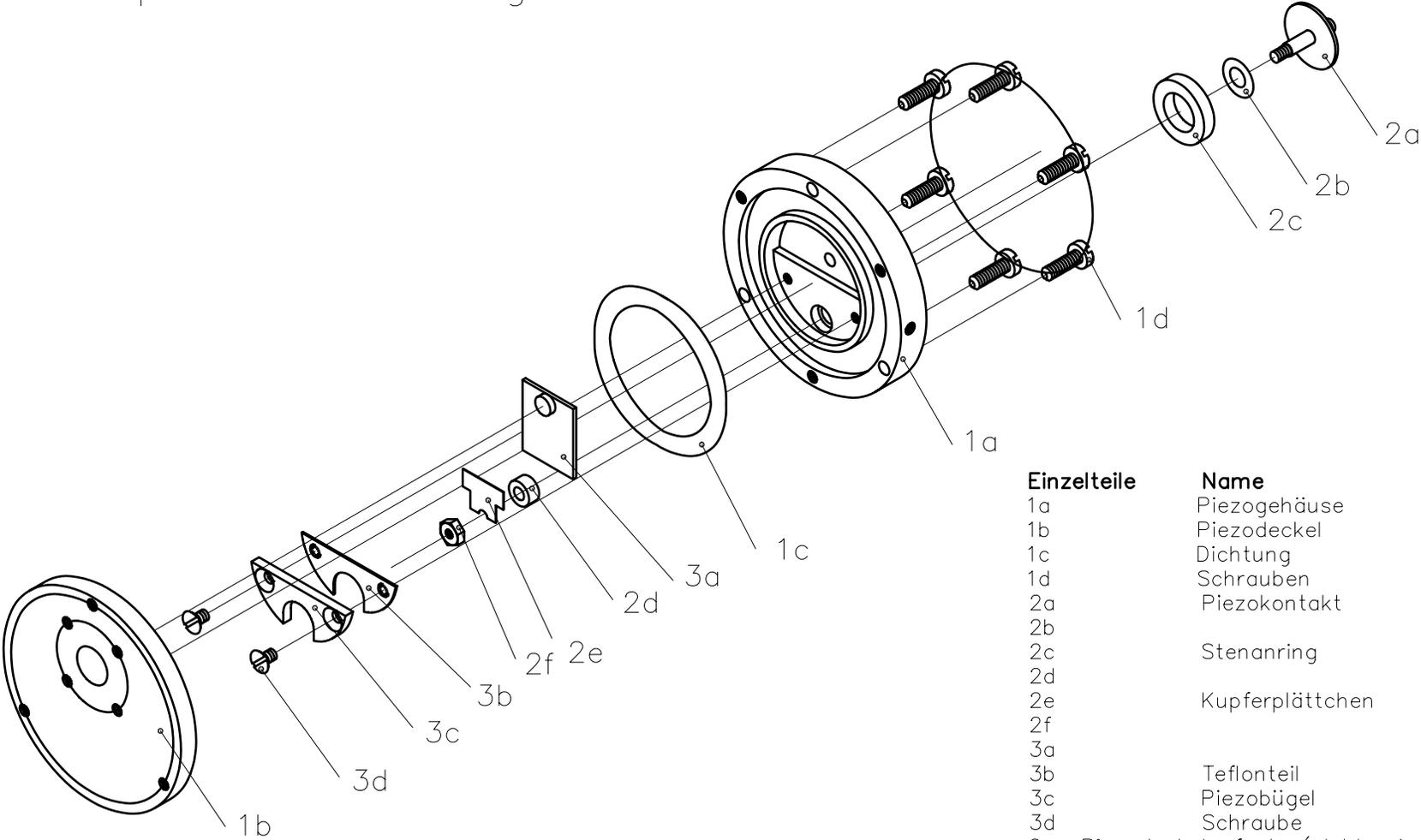
S-3: 1=INTERN
2=EXTERN

S-1: 1=1-Hz-10Hz → 10µF
2=10Hz-100Hz → 1µF
3=100Hz-1kHz → 0.1µF
4=1kHz-10kHz → 10nF

M 1280 Piezoansteuerung

DATE	NAME
22.2.91	KIENZLER

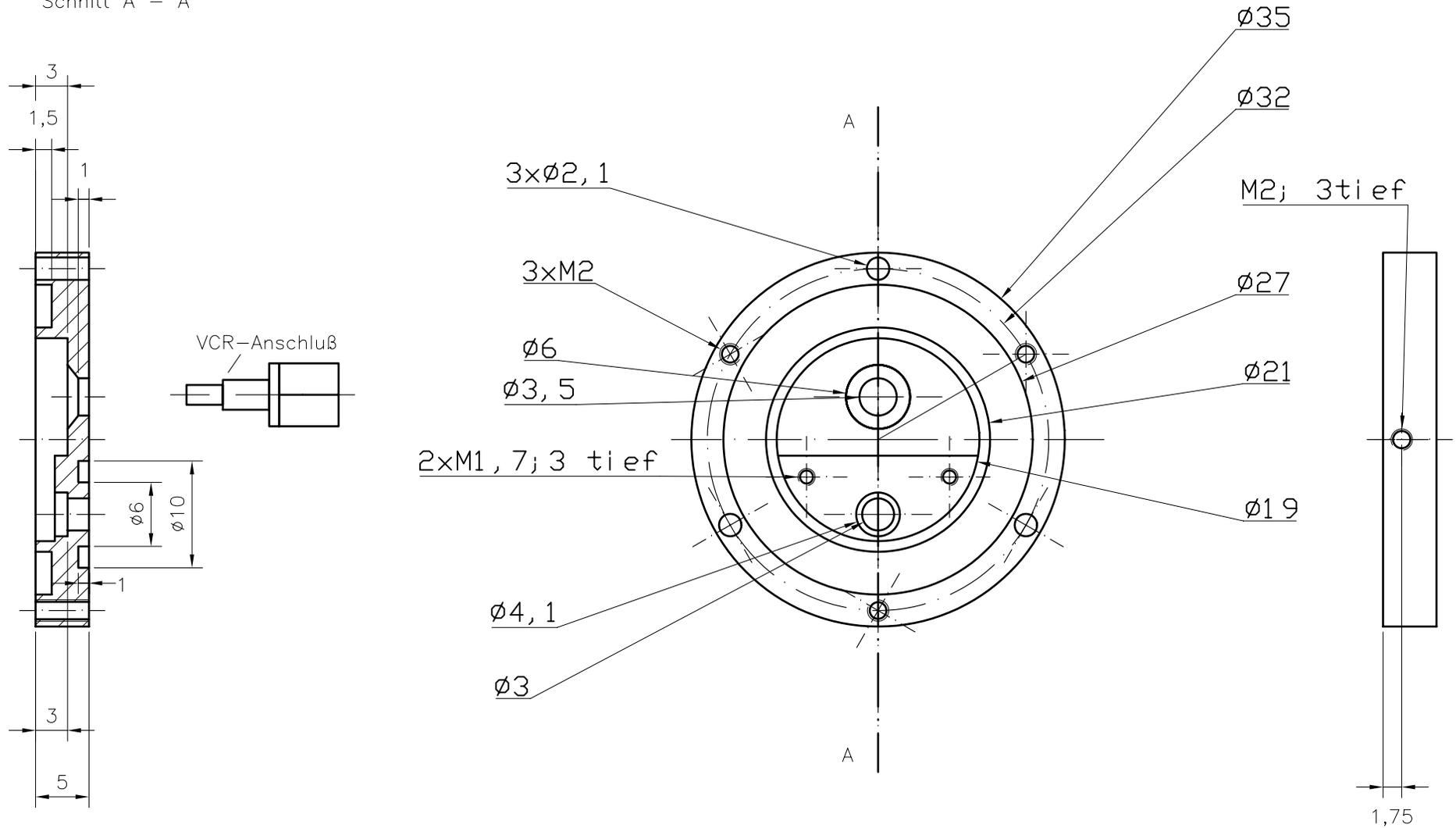
Explosionszeichnung – Piezo–klein –



Einzelteile	Name
1a	Piezogehäuse
1b	Piezodeckel
1c	Dichtung
1d	Schrauben
2a	Piezokontakt
2b	
2c	Stenarring
2d	
2e	Kupferplättchen
2f	
3a	
3b	Teflonteil
3c	Piezobügel
3d	Schraube
?	Piezodeckelaufsatz (elektr. Anschluß)

Teil 1a - Piezogehäuse _

Schnitt A - A

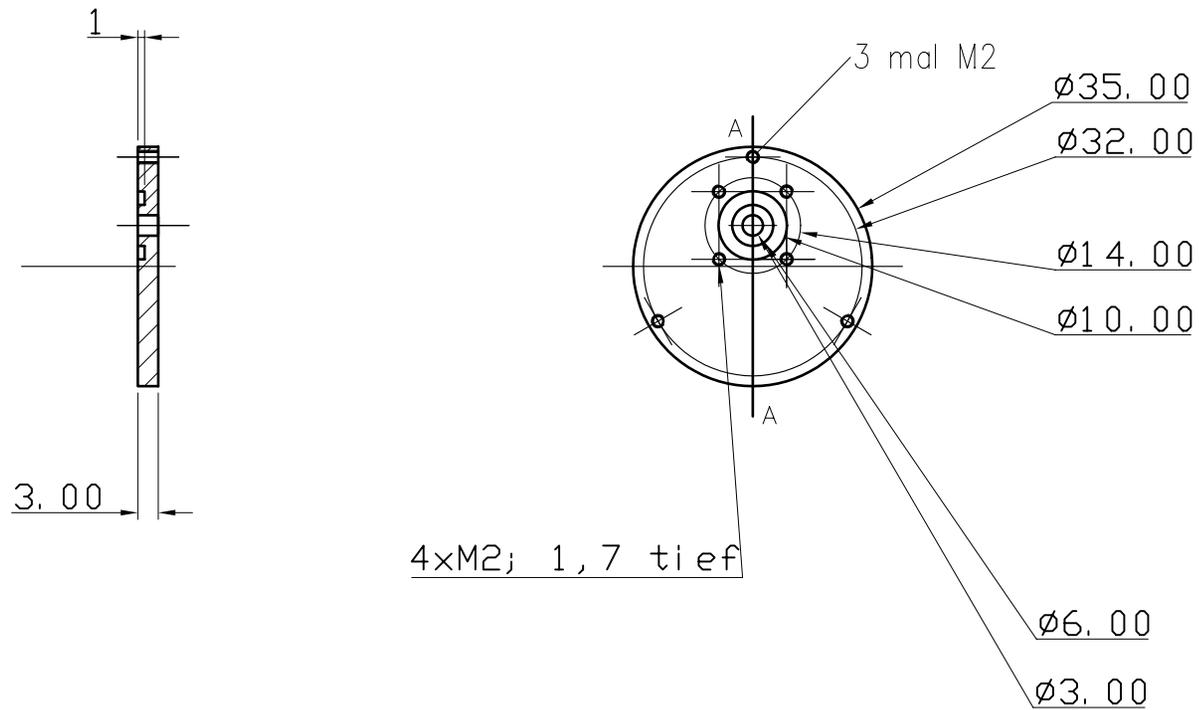


Material: V2a
Maßstab: 2:1

AFS\AutoCAD\Funktionseinheiten\Piezo\
_Piezo-klein\Piezo-klein-99\Piezogehäuse.dwg

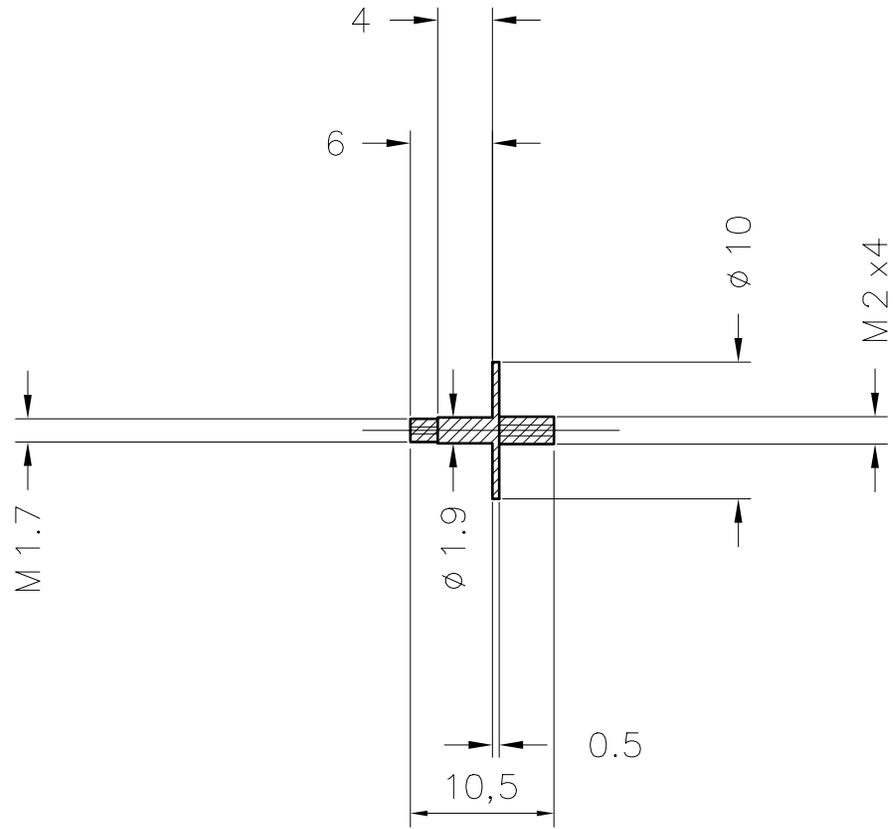
Teil 1b – Piezodeckel

Schnitt A – A



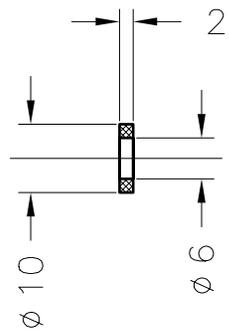
Material: V4a
Maßstab: 1:1

Teil 2a – Piezokontakt –



Material: V2A
Maßstab: 1:1

Teil 2c – Stenan –

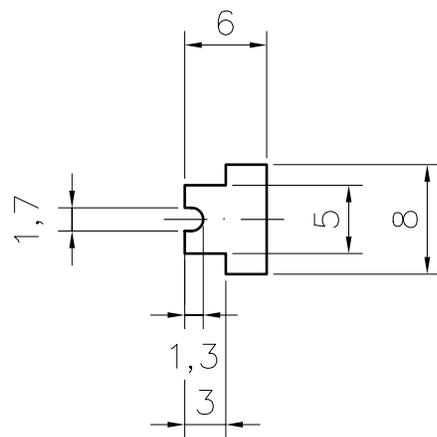


Material : Stenan

Maßstab : 1:1

AFS\AutoCAD\Funktionseinheiten\Piezo\Piezo-klein\
Piezo-klein-99/P_stenan.dwg

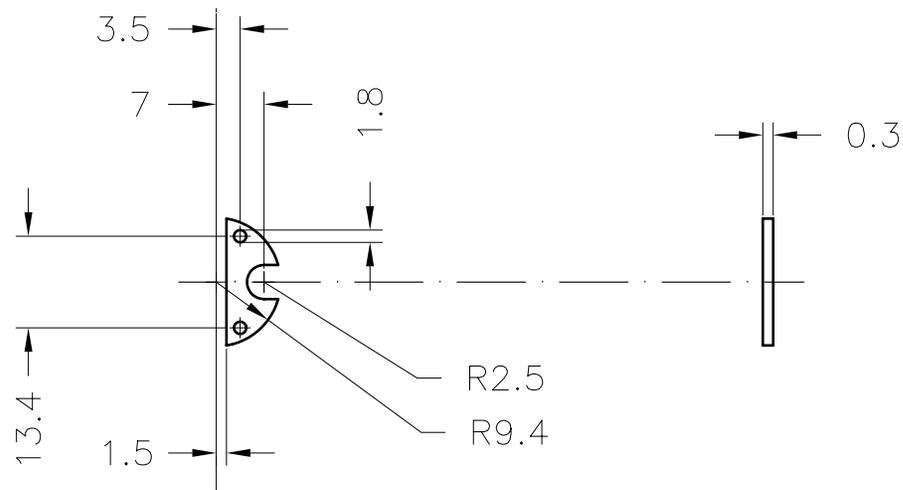
Teil 2e – Kupferplättchen



Dicke: 0.1mm

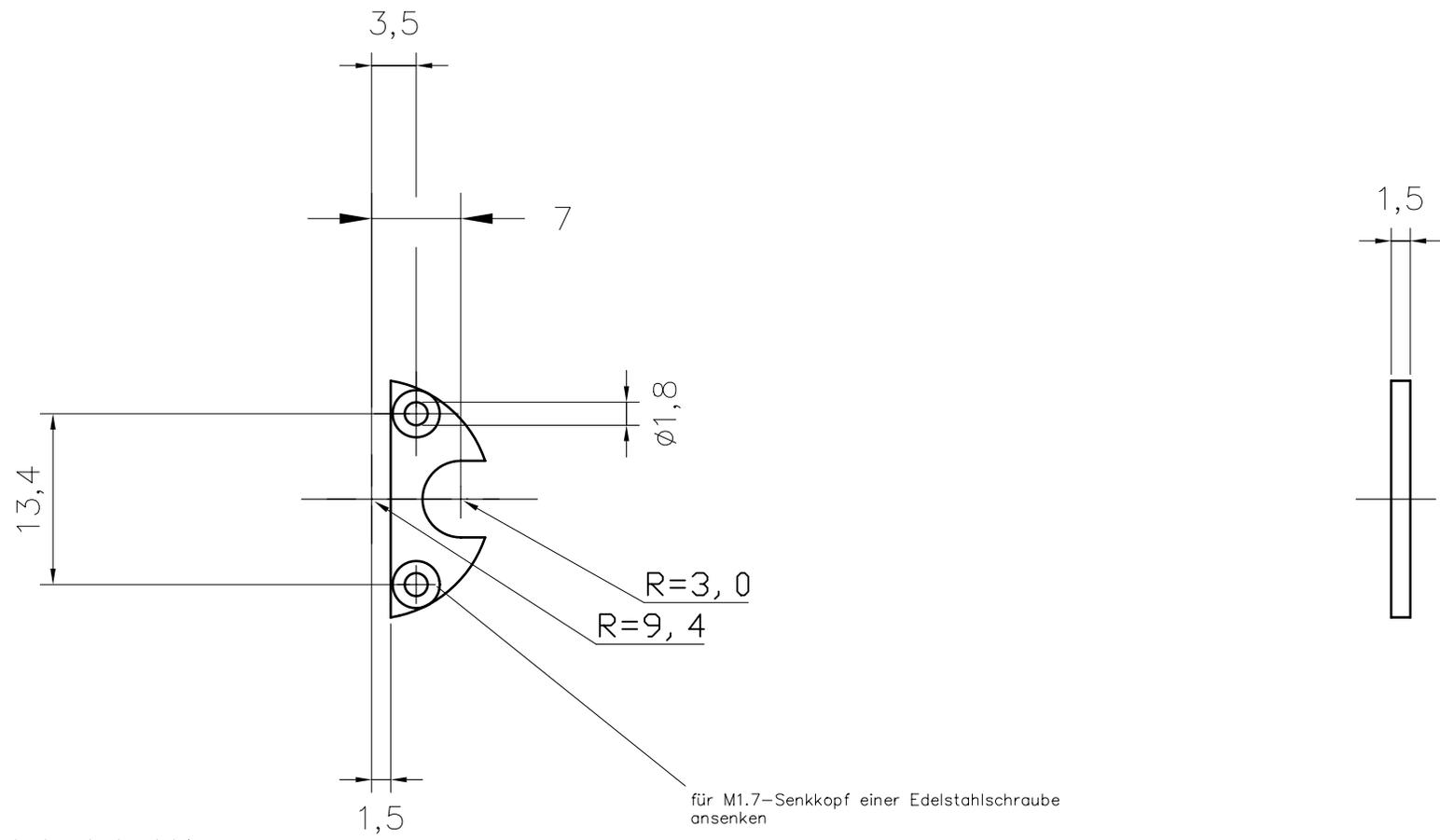
Material: Kupfer
Maßstab: 2:1

Teil 3b - Teflon -



AFS\AutoCAD\Funktionseinheiten\Piezo\Piezo-klein\
Piezo-klein-99/P_teflon.dwg

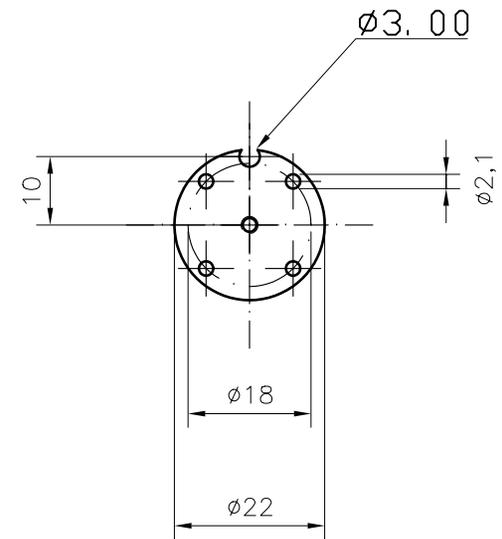
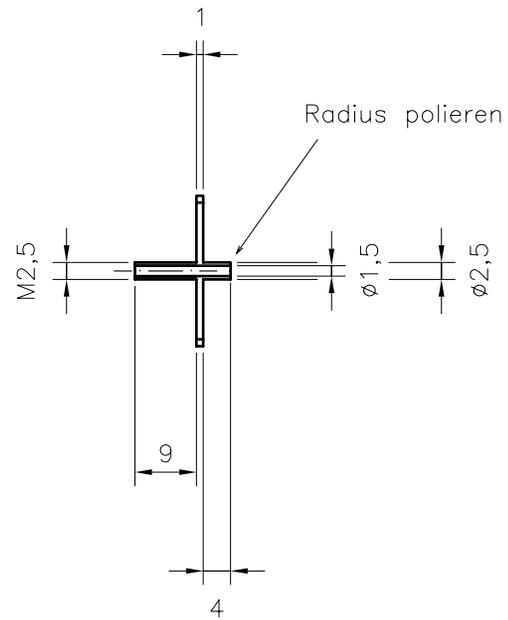
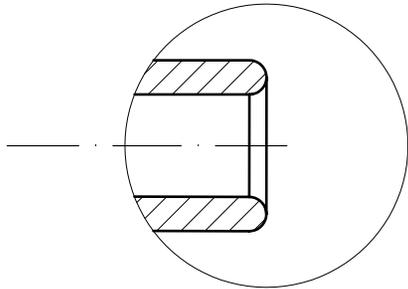
Teil 3c Piezobügel



Material: V4a
Maßstab: 2:1

Piezodeckelaufsatz

Vergrößerung polierte Fläche:



Material : V2A
Maßstab : 1:1

AFS\AutoCAD\App.-teile\piezo\piezo-klein\
Piezo-klein-99/deckelaufsatz.dwg