

Abschlussbericht

Teilvorhaben "Schnelle Festkörperaktoren"

im Teilprojekt 2 "Adaptive Treibgas-Aktorik"

des Gesamtvorhabens V 1232

"Hochzuverlässige Mikrosystemtechnologien für

intelligenten Insassenschutz"

HMI²

zur Vorlage beim Projektträger

VDI/VDE - Technologiezentrum Informationstechnik

GmbH

Aufgabenstellung

Zielsetzung dieses Teilprojektes ist eine Weiterentwicklung vorhandener Komponenten (Berstmembran und Zündung der Heizladung) sowie die Erhöhung des Insassenunfallschutzes durch eine aktive Massenstromregelung des Treibgases. Eine solche Massenstrombeeinflussung konnte von herkömmlichen Stellelementen aufgrund der geforderten Reaktionszeiten und Beschleunigungswerte im Verlaufe eines Unfalls nicht erzielt werden.

Gasmassenstromregelung

Zur Realisierung der Massenstromsteuerung von Airbag-Gasgeneratoren bieten sich im Wesentlichen zwei physikalische Systemlösungen an (siehe auch unten, „Öffnen der Berstmembran“). Einerseits kann der Massenstrom durch eine Veränderung des freien Strömungsquerschnittes beeinflusst werden. Hierzu soll ein Ventil in Miniaturbauweise entworfen und realisiert werden, welches Schaltzeiten von kleiner als 5 ms erlaubt. Dieses Ventil muss in einen Gasgenerator integrierbar sein und unter den (strömungs-)mechanischen und thermischen Belastungen am Gasgenerator zuverlässig funktionieren.

Öffnen der Berstmembran

Ein alternativer Ansatz auch zur Gasmassenstrombeeinflussung ist die Entkopplung der gaserzeugenden Systeme eines Hybrid-Gasgenerators. Hierzu muss das Öffnen der Berstmembran des Druckbehälters vom Abbrand der pyrotechnischen Heizladung zeitlich versetzt werden. Lösungsansätze bieten sich beispielsweise durch die Entladung eines Kondensators über die Berstmembran oder die Zerstörung der Berstmembran durch Resonanzschwingungen an, welche von einem auf der Berstmembran angebrachten Piezoring angeregt werden.

Leckagedetektion

Zur Erhöhung der Sicherheit ist es sinnvoll, durch Messungen an der Flasche auf deren Füllungsstatus zu schließen und so einen Gasverlust erkennen zu können. Diese Aufgabe soll durch den ohnehin zum Öffnen der Berstmembran verwendeten Piezoring erfüllt werden.

Automatisches Anzünden

Weiterhin ist angestrebt, den nach dem Öffnen der Berstmembran auftretenden schnellen Druckabfall in der Flasche zu detektieren und dieses Signal zur Zündung der Heizladung zu nutzen, im idealen Fall ohne eine zusätzliche Auswertung.

Voraussetzungen

Aufbauend auf dem Stand der etablierten Technik soll im Rahmen der im Pflichtenheft vorgegebenen Bedingungen untersucht werden, in wieweit ein Fortschritt in technischer und wirtschaftlicher Sicht durch den Einsatz von piezoelektrischen Festkörperwandlern erzielbar ist. Beispielhaft für die besonderen

Anforderungen im Rahmen dieses Projektes werden nachfolgend einige Forderungen aus dem Pflichtenheft zitiert, vergleiche auch den Abschlussbericht von TRW Airbag Systems GmbH & Co. KG:

- Funktionstemperaturbereich: -40 bis +107 °C
- Gewicht: ≈ 100 g
- Beschleunigung: ± 100 g
- Taktzeit für die Montage einer Ventileinheit: ≤ 10 s
- Mehrkosten: ≤ 10 DM

Planung und Ablauf

Aufgrund des Verkaufs von TEMIC Bayern-Chemie Airbag GmbH an TRW und die dadurch verzögerte Projektbestätigung kam es zu Anlaufschwierigkeiten, da betriebsinterne und für das Pflichtenheft grundlegende Informationen von TRW erst nach dem offiziellen Projektstart an die Teilprojektpartner weitergegeben werden konnten. Durch diese Anlaufschwierigkeiten bedingt wurde auch die geplante Verzahnung der Teilprojekte mit Zuarbeiten von befristet angestellten Wissenschaftlern des Lehrstuhls für Prozessautomatisierung gestört. Da einige der im Antrag formulierten Ziele zum Teil visionären Charakter haben, waren auch die zugehörigen Lösungsansätze eher im Forschungsbereich angesiedelt, d.h. in verschiedenen Bereichen existierte kein tradiertes Grundlagenwissen, das daher erst erarbeitet werden musste. Die durch den fortgeschrittenen Erkenntnisgewinn im Projektverlauf daher mehrfach neu zu definierenden Meilensteine haben die Einhaltung der vorher abgeschätzten Ablaufplanung erschwert. Die Arbeitspakete und die betreffende Terminierung mussten während des Projektlaufes mehrmals den Gegebenheiten angepasst werden, was sich auch in der Verlängerung der Projektlaufzeit widerspiegelt.

Wissenschaftlicher und Technischer Stand vor Projektbeginn

Bekanntes Verfahren, Konstruktionen und Schutzrechte:

für den Einsatz von Piezoaktoren in Airbag-Gasgeneratoren sind keine Verfahren, Konstruktionen und Schutzrechte bekannt.

Verwendete Fachliteratur, Informations- und Dokumentationsdienste:

Ergänzend zur Nutzung der Bibliotheken im universitären Bereich wurde die Fachveranstaltung „Actuator '98“ in Bremen besucht.

Erzieltes Ergebnis

Öffnen der Berstmembran:

Zum Öffnen der Berstmembran wurden drei prinzipielle Systeme in Erwägung gezogen:

Das direkte Aufstoßen der Berstmembran mit einem Stapelaktor hat den Nachteil, dass zum Ausgleich der gegensätzlichen Temperaturgänge von Aktor und Berstmembran ein großer Stellweg und eine hohe Fertigungspräzision erforderlich sind. Dadurch werden die Systemkosten stark in die Höhe getrieben, was zum Verwerfen dieses Lösungsansatzes führte.

Das ballistische Öffnen mittels Piezoelement stellt hohe konstruktive Anforderungen, um einerseits auch im Unfallmoment sicherzustellen, dass das Geschoss am Piezo anliegt, und andererseits genug Energie in das Geschoss zu übertragen. Ein vergleichbares Wirkprinzip ist billiger und sicherer mit etablierter Pyrotechnik lösbar.

Im Rahmen des Projektes wurde daher die dritte Methode, das Öffnen der Berstmembran durch Resonanzanregung, favorisiert. Aus verschiedenen Gründen, unter anderem auch aus dem Umfeld der Produktsicherheit, ist ein Eingriff in die Konstruktion der Berstmembran nicht möglich. Durch das Befüllen des Gasgenerators ändert sich die Geometrie der Berstmembran in einem Ausmaß, dem piezokeramische Werkstoffe nicht folgen können. Daher muss der Piezowandler nach dem Befüllen aufgebracht werden. Als neuralgischer Punkt hat sich die Klebefuge zwischen Piezokeramik und Berstmembran herauskristallisiert. Sie muss einerseits sehr steif sein, um möglichst gut Energie übertragen zu können, andererseits aber auch weich genug, um die unterschiedliche Wärmeausdehnung von Keramik und Berstmembran kompensieren zu können. Leider ist über eine solche Klebefuge bei weitem nicht genug Energie übertragbar, um die Berstmembran ausreichend zu schwächen. Die vorgesehene Betriebsfrequenz für dieses System war weit im 100-kHz-Bereich angesiedelt, um in wenigen Millisekunden bereits mehrere tausend Schwingungen einzuleiten. Parallel zu den Untersuchungen bezüglich der Befestigung der Keramik an der Berstmembran durchgeführte Versuche mit kommerziellen Ultraschallsystemen (22,4 kHz) zeigten keine Schwächung der Berstmembran. Da gleichzeitig beim Teilprojektspartner HBS die Versuche, die Berstmembran mittels Kondensatorentladung zu öffnen, erfolgversprechend verliefen, wurden die Arbeiten in diesem Bereich eingestellt.

Sensorik

Zur Bestimmung der Leckageverluste mit Hilfe von Piezokeramiken wurden verschiedene Prinzipien auf ihre Eignung hin untersucht. Das Ziel war es, ein robustes und kostengünstiges Messverfahren zu entwickeln, um den Druckverlust in den Gasflaschen der Airbag-Systeme im Laufe der angestrebten Lebensdauer von 15 Jahren zu bestimmen. Beim Unterschreiten eines Mindestdrucks soll eine Warnmeldung ausgegeben werden, so dass durch Austausch der Gaspatrone die Funktionsfähigkeit des Airbag-Systems wieder hergestellt werden kann.

Laufzeitmessung

Zunächst wurde das Prinzip der Laufzeitmessung eines Ultraschallsignals durch das in der Vorratsflasche enthaltene Treibgas zur Druckbestimmung untersucht. Dabei wird ein Ultraschallimpuls durch ein Piezoelement auf der Berstmembran erzeugt, welches sich durch die Gasflasche ausbreitet, am Flaschenboden reflektiert und schließlich wieder vom Piezoelement detektiert wird. Die gemessene Laufzeit ist abhängig vom Gasdruck in der Flasche und liefert im Vergleich zu einer Referenzmessung eine Aussage über die Druckdifferenz. Dieses Verfahren besitzt einige entscheidende Nachteile: Die Detektion des empfangenen Signals erfordert sehr großen technischen Aufwand, zum einen bei der rauscharmen Verstärkung der extrem schwachen Signale, zum anderen bei der exakten Messung der benötigten Laufzeit (hochgenaue Taktgenerierung und große Zähler bei hoher Zeitauflösung). Erschwerend kommt hinzu, dass durch unvermeidliche Reflexionen und Nebenwege des Ultraschallsignals Echos und Mehrfachdetektionen entstehen, die im Piezoelement zu Störsignalen führen, welche ohne großen technischen Aufwand nicht eindeutig vom Nutzsignal zu trennen sind. Ein weiterer Nachteil liegt in der Bestimmung der Referenzlaufzeit bei normalem Druck, die stark temperaturabhängig ist. Liegt ein Druckabfall in der Flasche bei einer anderen Umgebungstemperatur vor, ist die dabei gemessenen Laufzeit nicht mit der Referenzlaufzeit vergleichbar. Nur durch mathematische Verfahren, die auf einem Mikrocontroller durchgeführt werden müssten, lässt sich das Messergebnis in einen vergleichbaren Zahlenwert umrechnen, um schließlich eine Aussage über den aktuellen Druck zu treffen.

Aufgrund dieser Nachteile und der für eine Realisierung zu erwartenden Kosten konnte dieser Ansatz nicht bis zum Ende verfolgt werden.

Resonanzfrequenzmessung

Bei diesem Ansatz wird die Eigenschaft der Berstmembran genutzt, sich abhängig vom Druck zu wölben. Ein aufgeklebtes Piezoelement nimmt die Dehnung auf und verändert dabei seine elektromechanische Serienresonanz.

Zunächst wurde die Kapazität mit einer konstanten Induktivität zu einem Schwingkreis zusammengefügt. Eine Druckänderung führt so zu einer Verstimmung des Schwingkreises. Versuche mit diesem Aufbau lieferten allerdings unbefriedigende Ergebnisse, die keine auswertbare Abhängigkeit der Verstimmung des Schwingkreises von der Druckänderung belegen konnten. Im Verlaufe dieser Untersuchungen wurde jedoch festgestellt, dass sich die elektrische messbare Kapazität sehr wohl in Abhängigkeit zum Fülldruck ändert. Daher wurde in weiteren Versuchen die Kapazität des Piezoelements direkt mittels einer Messbrücke erfasst.

Kapazitätsmessung

Zunächst wurden bei unterschiedlichen Temperaturen und Messfrequenzen Kapazitätsverläufe bei einer sprunghaften Druckänderung von 10 bar gemessen. Dabei ergab sich eine eindeutige Abhängigkeit der

Kapazitätsänderung von der Druckänderung (s. Bild 1). Mit zunehmender Zeit wurde die Kapazitätsänderung jedoch immer geringer, bis der Ausgangswert wieder erreicht war (Driften). Ausserdem führten Drucksprünge konstanten Betrags bei verschiedenen Temperaturen zu Kapazitätssprüngen unterschiedlichen Betrags.

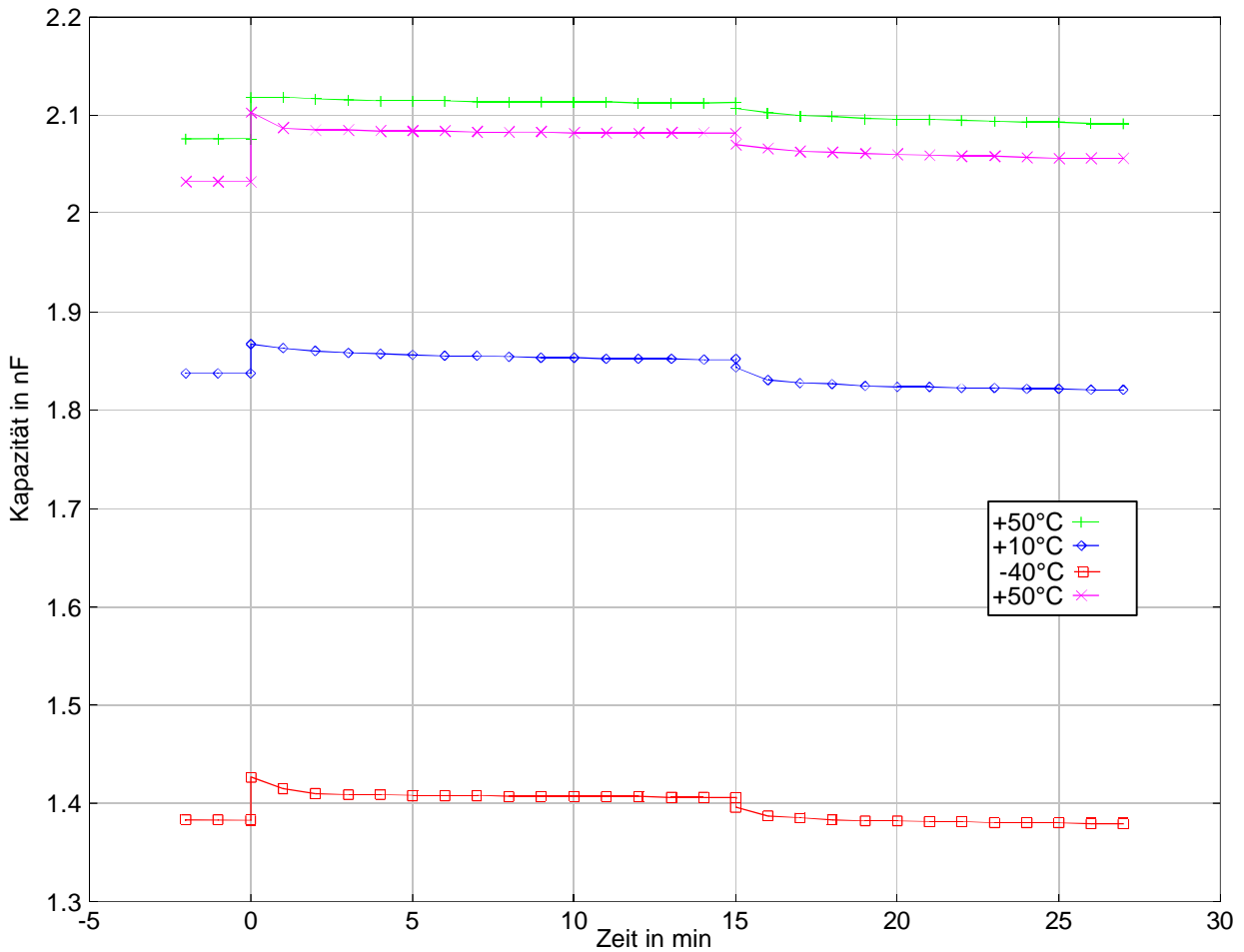


Bild 1: Zeitverläufe der Kapazität bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen bei Drucksprüngen um +10 bar bei 0 min und -10 bar bei 15 min (Messfrequenz 100 Hz).

Es wurde daher eine Temperaturkompensation mit Hilfe einer Differenzmessung durchgeführt. Dazu wurde ein nicht aufgeklebtes Piezoelement als Referenzkapazität demselben Temperaturverlauf ausgesetzt wie das druckbeaufschlagte Piezoelement auf der Berstmembran (s. Bild 2). Es stellte sich in einer umfangreichen Umweltsimulation heraus, dass die Kapazität der beiden Piezoelemente trotz identischer Vorgeschichte unterschiedliches Hystereseverhalten aufwiesen, und zwar vom Betrag größer als die Kapazitätsänderung durch den zu detektierenden Drucksprung.

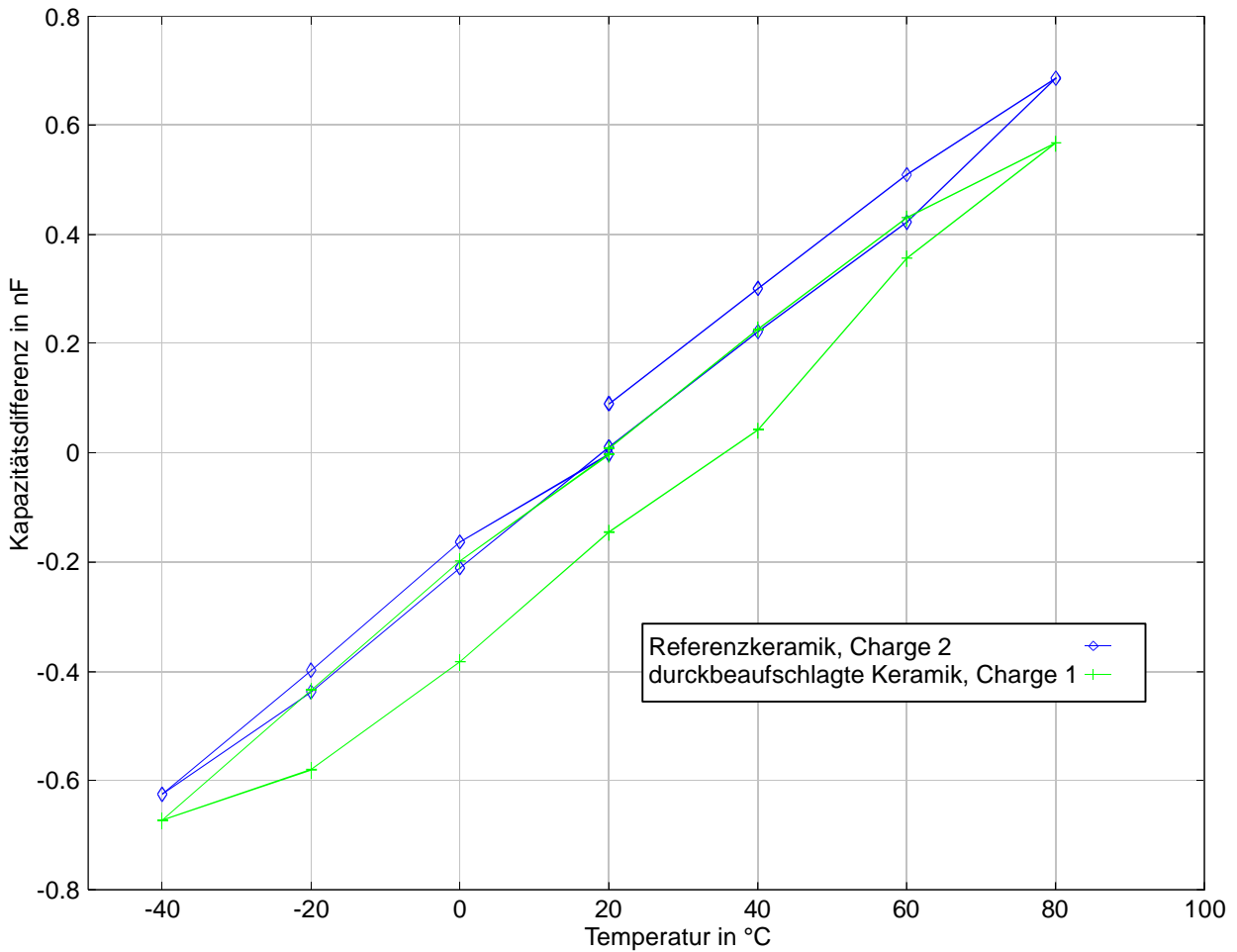


Bild 2: Hysterese eines druckbelasteten und eines nicht aufgeklebten Piezoelements

Zum Vergleich wurde ein weiteres, ebenfalls auf eine Berstmembran aufgeklebtes Piezoelement derselben Charge vermessen (s. Bild 3). Auch hier stellte sich heraus, dass die Hysterese der Kapazität unterschiedlich zu jener der belasteten Probe war. Sie fiel zwar etwas geringer als bei der nicht aufgeklebten Probe aus, war aber trotzdem größer als der Messwert.

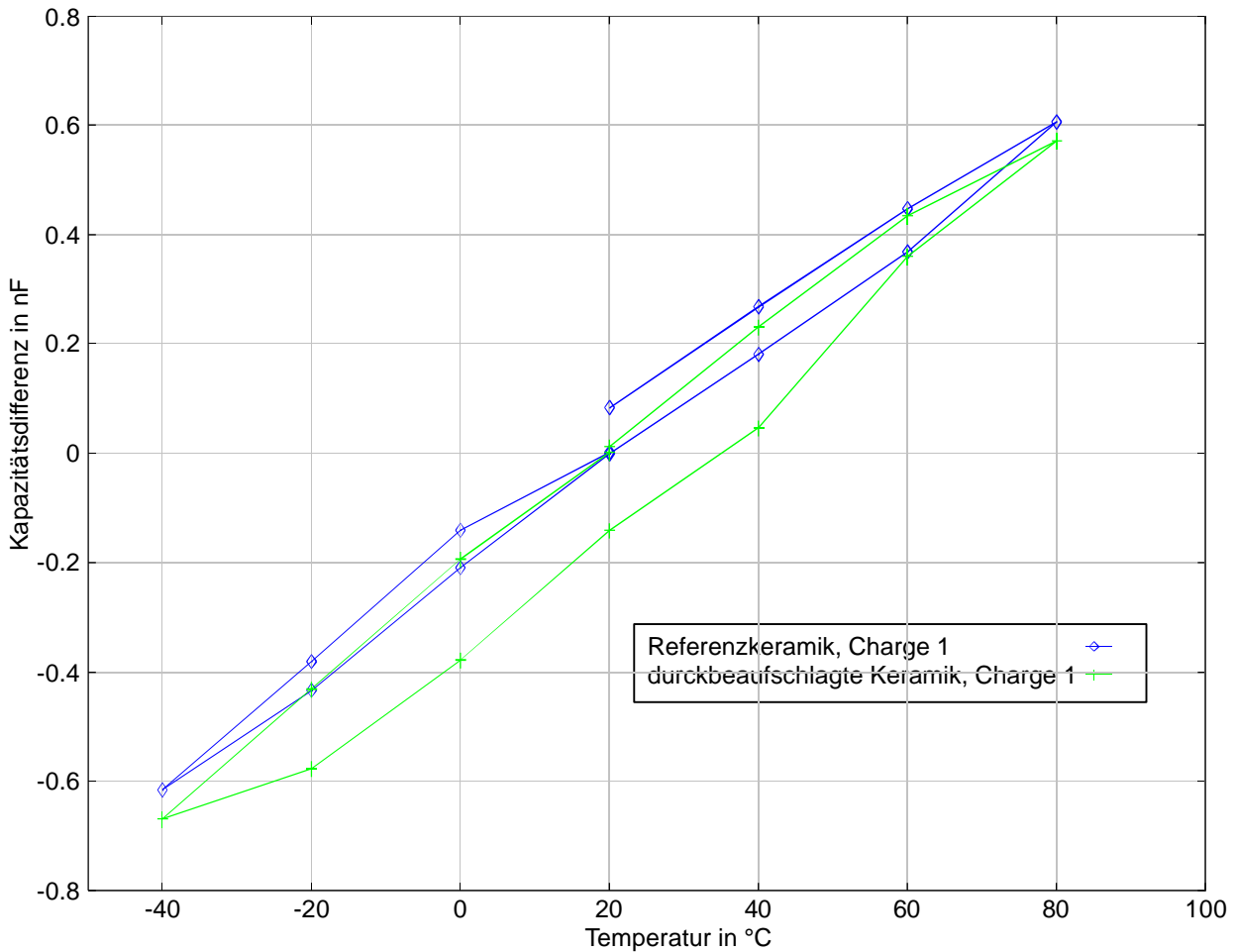


Bild 3: Hysterese eines druckbelasteten und eines aufgeklebten, unbelasteten Piezoelements

Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass eine Abhängigkeit der Kapazität eines auf der Berstmembran aufgeklebten Piezoelements vom wirkenden Gasdruck der Vorratsflasche besteht. Dieser Effekt ist jedoch von Kriecheffekten des Piezoelements gegenüber der Berstmembran überlagert, so dass die messbare Kapazitätsänderung eines Drucksprungs innerhalb kürzerer Zeit verschwindet. Schleichende Druckverluste sind auf diese Weise nicht zu detektieren. Hinzu kommt, dass eine unbedingt notwendige Temperaturkompensation durch ein Differenzverfahren nicht möglich ist, da die Piezoelemente, sogar die aus derselben Charge, unterschiedlichen Hysterese-Einflüssen unterliegen, deren Betrag größer ist als der Messwert der Kapazitätsänderung durch den Drucksprung. Der Grund hierfür ist in der Klebeschicht zwischen Piezoelement und Berstmembran sowie in den Besonderheiten ferroelektrischer Materialien zu sehen.

Da es sich bei den vorliegenden Musterexemplaren um ungerückte und damit ebene Berstmembranen handelte, ließen sich die scheibenförmigen Piezoelemente flächig auf der Membran befestigen. Durch die Gasbefüllung der Flasche wölbt sich die Berstmembran jedoch halbkugelförmig aus, so dass ein Anbringen der Piezokeramik vor der Befüllung nicht sinnvoll ist. Durch eine aufwendige Befestigung auf

einem Zwischenring könnten die Piezoelemente auf der dann gewölbten Membran angebracht werden. Dieser Arbeitsschritt ist allerdings sehr aufwendig und würde dennoch zu einer geringeren Messempfindlichkeit und zu größeren Störgrößeneinflüssen, besonders durch die Umgebungstemperatur, führen.

Automatisches Anzünden der Heizladung

Durch die hohe Austrittsgeschwindigkeit des Kaltgases beim Hybridgenerator entsteht durch Abkühlung letztendlich eine Volumenreduktion, welche die Funktionsfähigkeit des Airbags stark beeinflussen kann. Daher ist es erforderlich, durch eine zusätzliche Heizladung das ausströmende Kaltgas zu erwärmen, um ein Austrittsvolumen garantieren zu können. Das automatische Zünden dieser Heizladung soll mit Hilfe eines Piezoelementes realisiert werden. Bereits ein Druckabfall von ca. $20 \cdot 10^5$ Pa bedeutet eine sichere Öffnung der Berstmembran und somit muss die Heizladung gezündet werden.

Die zugrunde liegende Idee ist, möglichst schnell eine Ladung auf einem Piezoelement zu generieren; die elektrische Energie muss dann ausreichen, um eine pyrotechnische Heizladung zu zünden. Die erforderliche Zündenergie liegt derzeit bei ca. 100 mJ für pyrotechnische Elemente und ist reduzierbar bis in den Bereich um 1 mJ, im Vergleich dazu beträgt die Zündenergie für Erdgas ca. 3 mJ.

Zwei Lösungsansätze sind hier denkbar:

- 1) mechanische Energieerzeugung: Ausnutzung des direkten piezoelektrischen Effektes zur Ladungsgenerierung
- 2) thermische Energieerzeugung: Ausnutzung des pyroelektrischen Effektes zur Ladungsgenerierung

Grundlagen zu 1)

Vom direkten piezoelektrischen Effekt spricht man, wenn eine mechanische Deformation eines piezoelektrischen Körpers zu einer proportionalen Änderung seiner elektrischen Polarisierung führt. Elektrisch stellt eine Piezokeramik hauptsächlich eine Kapazität (Plattenkondensator mit Keramik als Dielektrikum) dar, welche die Energie $W = 0,5 \cdot D \cdot E \cdot V$ speichern kann, wobei V das Volumen des homogenen Feldes ist. Diese Energie muss im vorliegenden Fall ausreichen, um die zusätzliche Heizladung zu zünden. Die dielektrische Verschiebung D ist über den Piezomodul direkt mit der mechanischen Spannung, die auf das Piezoelement ausgeübt wird, gekoppelt. Das Problem ist somit hauptsächlich die schnelle Übertragung einer mechanischen Belastung auf einen piezoelektrischen Energiewandler.

Dies ist lösbar durch eine mechanische Konstruktion, die aufgrund von Druckausgleichsvorgängen innerhalb des Hybridgenerators eine Kraft auf ein Piezoelement ausübt und somit hauptsächlich den direkten piezoelektrischen Effekt nutzt (siehe Bild 4). Im Bild ist die Ankopplung an die zu zündende Heizladung aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht eingezeichnet. Nach dem Öffnen der Berstmembran (große Austrittsöffnung) fällt der atmosphärische Druck im Hybridgenerator P_0 rasch ab. Da die

Ausgleichsöffnungen einen sehr viel kleineren Querschnitt aufweisen, kann der Druck P_1 zeitlich nicht folgen. Durch die Druckdifferenz $(P_1 - P_0)$ wird über den Arbeitskolben die Kraft $F = (P_1 - P_0) \cdot A$ auf das Piezoelement ausgeübt.

Erste Simulationen der mechanischen Spannungen haben bereits im Ansatz gezeigt, dass der Aufbau über eine sehr hohe mechanische Steifigkeit verfügen muss, um die Energie verlustarm in den Piezowandler zu übertragen, gleichzeitig aber ein „weiches“ langzeitverhalten aufweisen muss, um unterschiedliche Temperaturexpansionen der Materialien ausgleichen zu können. Die Umsetzung der benötigten Mechanik ist zwar realisierbar, jedoch nur mit sehr hohem Aufwand und kann im vorgegebenen Kostenrahmen nicht umgesetzt werden.

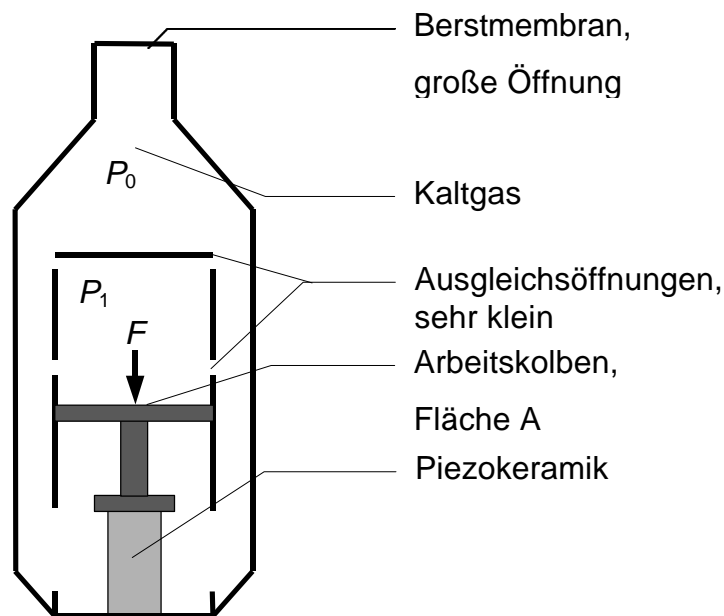


Bild 4: Hybridgenerator mit interner Mechanik

Der zur Verfügung stehende Bauraum, die einzuhaltende Einbauzeit (Zykluszeit in der Serienmontage) und die sehr hohen Kosten für die Umsetzung führten zu der Entscheidung, diese Lösung nicht weiter zu verfolgen und ein einfacheres Konzept zu untersuchen.

Grundlagen zu 2)

Die Kristalle der zehn polaren Kristallklassen mit singulären polaren Richtungen besitzen eine spontane elektrische Polarisierung. Der piezoelektrische Effekt ist eine Änderung der Polarisierung durch mechanische Wirkung.

Die Polarisation ist jedoch auch von der Temperatur abhängig. Dieses Phänomen beschreibt der pyroelektrische Effekt (griechisch: pyro = Feuer) oder einfach Pyroeffekt; der dazu reziproke Effekt heißt elektrokalorischer Effekt.

Jeder pyroelektrische Kristall ist auch piezoelektrisch, umgekehrt besitzen die piezoelektrischen Kristalle der polar-neutralen Kristallklassen keine pyroelektrischen Eigenschaften.

Neben diesem primären pyroelektrischen Effekt (Abhängigkeit der Flussdichte von der Temperatur, ohne Deformation), tritt auch ein sekundärer Effekt auf, bei dem die Temperaturänderung eine Deformation der Probe bewirkt, was wiederum aufgrund des direkten piezoelektrischen Effektes eine Polarisation verursacht. Die Ursache für den 'wahren' pyroelektrischen Effekt ist in einem Umbau des Kristallgitters zu finden.

Der Lösungsvariante liegt folgende Idee zugrunde: Nach dem Öffnen der Berstmembran kommt es durch das ausströmende Gas zu einer deutlichen Temperaturänderung (Abkühlung) im Generator. Diese Abkühlung soll bei einem piezoelektrischen Element aufgrund des oben beschriebenen direkten und indirekten pyroelektrischen Effektes zu einer Ladungsgenerierung führen.

Untersuchungen

Mehrere Piezokeramiken verschiedener Zusammensetzung und unterschiedlicher Geometrie wurden auf ihre Temperaturempfindlichkeit hin analysiert. Bei allen Messungen zeigte sich, dass das Hauptproblem darin besteht, die Temperaturänderung im Inneren der Keramik zu erzeugen. Der Abbau der generierten Ladung über den Innenwiderstand ist ein Prozess, der dem eigentlichen Nutzeffekt (pyroelektrischer Effekt) entgegenwirkt und ihn somit hemmt. Bei Zimmertemperatur beträgt der Anteil des pyroelektrischen Effektes nur ca. 2 bis 5% des totalen Effektes. Bei der vereinfachenden Darstellung als Plattenkondensator (vergleiche Bild 5) wird deutlich, dass die Zeitkonstante für die Selbstentladung τ ausschließlich von Materialparametern bestimmt wird und von der Geometrie nicht beeinflusst werden kann.

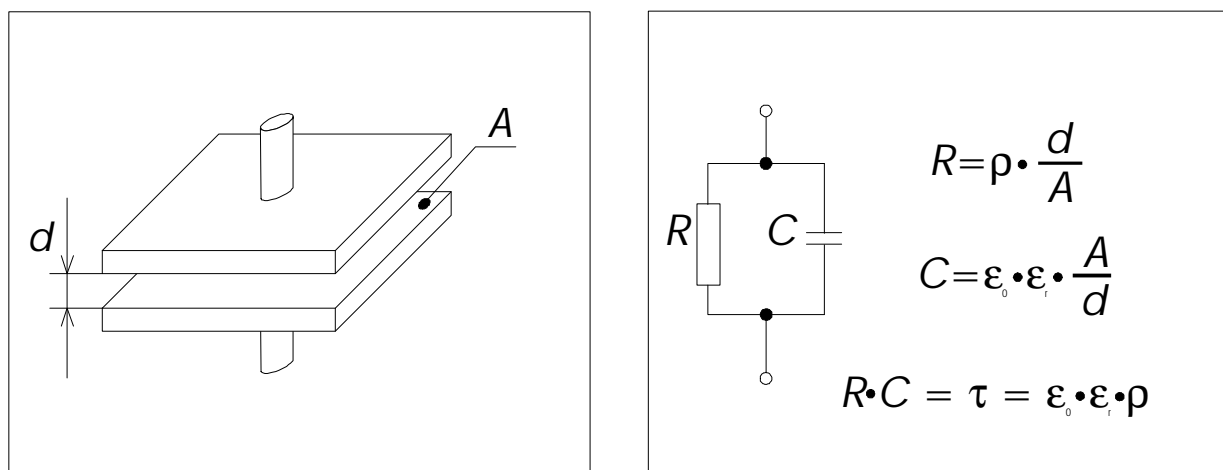


Bild 5: Elektrisches Ersatzschaltbild einer Plattenanordnung

Gasmassenstromregelung

Anhand der engen Vorgaben laut Pflichtenheft vor allem bezüglich der Systemkosten mussten Lösungen, die auf Piezostapelwandlern basieren, von vorneherein ausgeschlossen werden. Die deutlich preiswerteren tubusförmigen Piezoaktoren sind für den Betrieb als stellwegerzeugendes Element nicht geeignet. So war die Verwendung von Piezobiegewandlern bereits zu Projektbeginn nach einer ersten Auswertung des Pflichtenheftes eindeutig vorgegeben. Die ersten Lösungsvarianten sahen vor, mehrere Biegewandler in Sternform mechanisch parallel zu schalten, um die relativ geringe Einzelkräfte auf die geforderte Gesamtkraft von ca. 70 N zu addieren und gleichzeitig eine Redundanz in der Anzahl der Piezowandler zu gewährleisten (Bild 6).

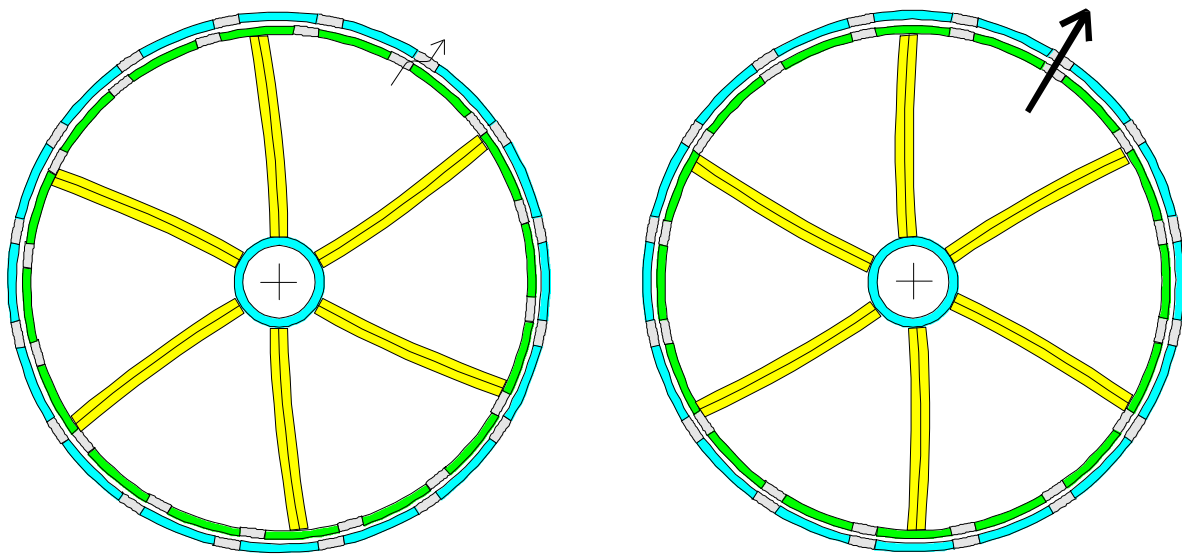


Bild 6: Sternförmige Anordnung der Wandler

Zur Unterstützung des Projektpartners PI-Ceramic bei der Weiterentwicklung der Keramik im Hinblick auf die geforderten Umgebungsbedingungen wurden umfangreiche Messungen an Standardbiegewandlern und an von PI im Projektrahmen weiterentwickelten Werkstoffen und Bauformen durchgeführt. Diese Messungen sollten die notwendigen mechanischen Leistungsdaten für die Anforderungen laut Pflichtenheft bestätigen und ihre Einhaltung über den gesamten Funktionstemperaturbereich nachweisen. Die diesbezüglichen Fortschritte sind im Berichtsteil von PI-Ceramic dokumentiert. Noch während der Weiterentwicklung der Keramiken haben erste Kraftmessungen im Hause TRW gezeigt, dass die auf Berechnungen beruhenden Stellkraftforderungen laut Pflichtenheft deutlich nach oben korrigiert werden mussten. Die daraufhin neu zu erarbeitenden Lösungsvarianten waren auf ein Vorsteuerventil ähnlich einem Servoventil ausgelegt (Bild 7).

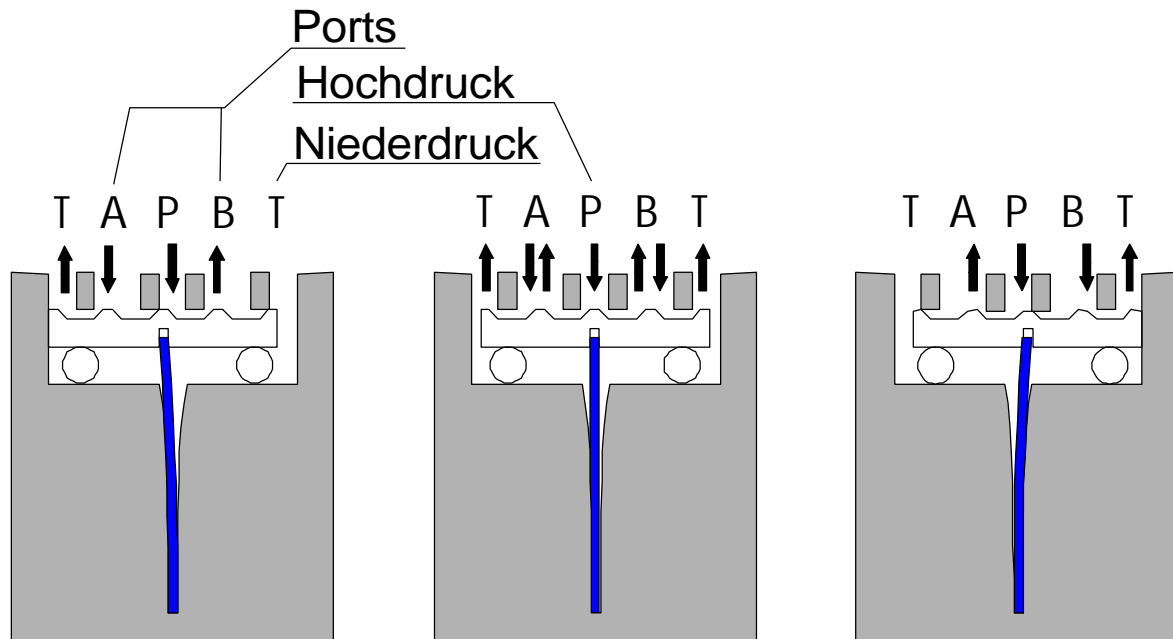


Bild 7: Funktionsprinzip Vorsteuerventil

Nachdem bei TRW durch den Einsatz speziell entwickelter Messverfahren der Kraftverlauf während eines vollständigen Ausblasvorganges aufgezeichnet werden konnte, hat sich gezeigt, dass die Anforderungen an die Stellkraft erneut erhöht werden müssen, und dass die hochfrequenten Kraftschwankungen das Halten einer definierten Position zusätzlich erschweren, wenn nicht vollends unmöglich machen. Daher wurde beginnend mit einem Projekttreffen Ende 1998 in Lederhose die Anforderung herausgearbeitet, dass der Gasmassenstrom weiterhin mit einem Kolben beeinflusst wird, das Vorsteuerventil dazu jedoch schaltend und mit einer Einzelpulssteuerung arbeiten muss. Da das Verhältnis von der vom Gasmassenstrom verursachten, auf den Kolben wirkenden Kraft zur Klemmkraft eines Piezobiegeaktors mittlerweile auf ca. eintausend zu eins angewachsen war, musste dieses Vorsteuerventil zweistufig ausgeführt werden. Die Lösungsvariante hierzu (vergleiche Bild 8a und Bild 8b) wurde im Rahmen der Projektbesprechung im Dezember 1999 in Saarbrücken als einzig verbliebener, erfolgversprechender Ansatz zur Konstruktion (vergleiche Bild 9) freigegeben. Aufgrund der kurzen verbliebenen Projektlaufzeit konnte die konstruktive Umsetzung nicht durch statische und dynamische FE-Simulationen unterstützt werden. Das Ventil besteht im Wesentlichen aus der Grundplatte, welche die statischen Elemente beinhaltet und den Piezobiegeumwandler fixiert, und aus dem Steuerschieber. Das Besondere an dieser Konstruktionsvariante ist, dass der Steuerschieber nur in seiner jeweiligen Endposition die Entlastungsbohrungen freigibt und erst dann in die Gegenrichtung verfahren werden kann. Durch dieses Verhalten wird eine einmal vorgegebene Position angefahren, bis sie erreicht ist. So werden die starken Störungen auf der Verstellkraft des Kolbens von den Piezoaktoren ferngehalten.

Grundplatte

Steuerschieber

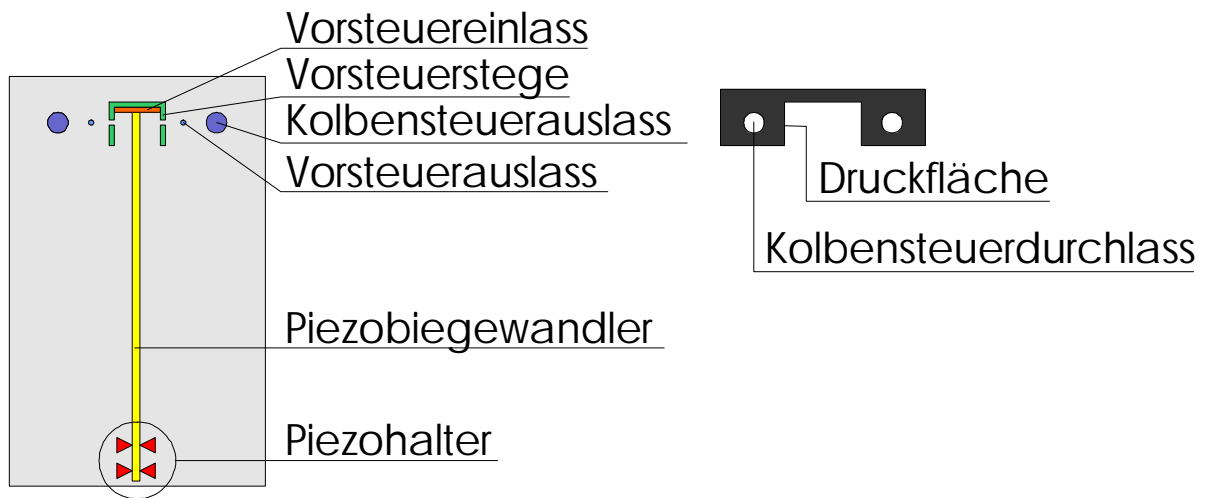


Bild 8a: Skizze der Bauteile des schaltenden Vorsteuerventiles

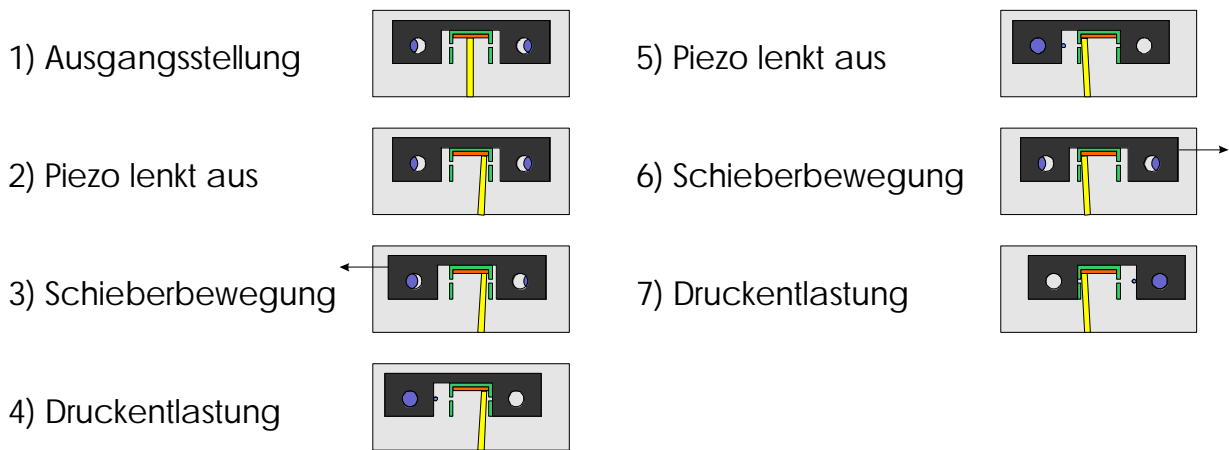


Bild 8b: Funktionsskizze eines Schaltvorganges

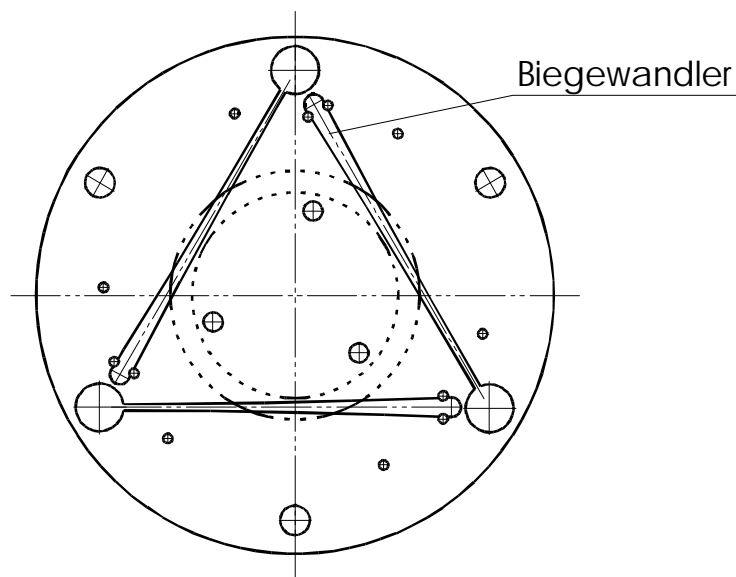


Bild 9: Konstruktionszeichnung der Grundplatte mit drehsymmetrischer Anordnung der Piezobiegewandler

Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses, Erfahrungen

Im Bereich des Öffnens der Berstmembran sind die Anforderungen durch den Einsatz von Piezoaktoren vor allem im Hinblick auf die wirtschaftlichen Randbedingungen derzeit nicht erfüllbar. Das Öffnen der Berstmembran durch Aufstoßen mit einem Stapelaktor ist bei einer geeigneten Temperaturdriftkompensation realisierbar, jedoch ist eine starke Reduzierung der Kosten für den benötigten Piezoaktor eine unabdingbare Voraussetzung zur Einhaltung der vorgegebenen Systemkosten. Sollte eine zukünftige Massenproduktion von Piezostapelaktoren zu deutlich kostengünstigeren Herstellungsprozessen führen, kann dieser Ansatz wieder aufgegriffen werden.

Zur Gasleckagedetektion ist es erforderlich, dass die verwendeten Keramiken ein gedächtnisloses Verhalten entwickeln. Diese Eigenschaft ist jedoch in der Hysterese der Piezokeramik verankert. Erst wenn die Keramik so empfindlich gemacht werden kann, dass eine geringe Druckänderung zu einer deutlich über den Hystereseeffekten liegenden, mit einfachen Methoden messbaren Veränderung führt, kann die Leckagedetektion mittels einer auf der Berstmembran befindlichen Piezokeramik zum gewünschten Erfolg führen.

Das automatische Anzünden der Heizladung ist unter Ausnutzung des pyroelektrischen Effektes nicht möglich. Die konstruktiven Anforderungen an eine Lösung, die mit Quetschen eines Piezos arbeitet, sind aufgrund der erforderlichen Steifigkeit so hoch, dass eine solche Variante nicht wirtschaftlich sinnvoll einsetzbar ist. Die von Feuerzeugen bekannten Piezo-Schlagzünder sind durch die im Unfallmoment zu berücksichtigenden hohen Beschleunigungen nicht sicher genug. Die dem Stand der Technik entsprechenden pyrotechnischen Zünder sind allen erarbeiteten Lösungsansätzen überlegen.

Zur Beeinflussung des Gasmassenstromes sind Piezoaktoren generell in der Lage. Ob das zum Ende der Projektlaufzeit gefertigte Versuchsmuster eines zweistufigen Vorsteuerventils den Anforderungen des Pflichtenheftes gegebenenfalls durch Weiterentwicklung in ausreichendem Umfang gerecht werden kann, muss noch untersucht werden. Sollte, wie bereits erwähnt, der Preis für Stapelaktoren um Größenordnungen zurückgehen, wäre ein aus wirtschaftlichen Gründen verworfener Ansatz wieder interessant. Diese Lösungsvariante sieht vor, den zuerst zum Öffnen der Berstmembran verwendeten Stapelaktor anschließend zum direkten Betätigen des Massenstromes zu verwenden. Aufgrund des vergleichsweise geringen Hubes eines Stapelaktors sind dadurch erhöhte Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit des Ventils zu stellen.

Fortschritt auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Fortschritte mit piezogesteuerten Systemen bei anderen Stellen sind während der Projektlaufzeit nicht bekannt geworden.

Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses

Eine Veröffentlichung ist im Rahmen des öffentlichen Abschlussseminars geplant.

Saarbrücken, den 22. März 2000

(Dipl.-Ing. (FH) Th. Würtz)

(Prof. Dr.-Ing. habil. H. Janocha)

