



Doctoral Thesis

## **Stahl-Keramik-Verbundrohr unter Höchstbelastungen durch Innendruck und Temperatur**

**Author(s):**

Meier, Jürg Andreas

**Publication Date:**

1992

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000626285> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

27. Feb. 1992

Diss. ETH Nr. 9616

**Stahl-Keramik-Verbundrohr unter  
Höchstbelastungen durch Innendruck und  
Temperatur**

ABHANDLUNG  
zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN  
der  
EIDGENOESSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

JÜRIG ANDREAS MEIER  
Dipl. Masch. Ing. ETH  
geboren am 10. Mai 1961  
von Würenlingen AG

Angenommen auf Antrag von:  
Prof. Dr. M. Sayir, Referent  
Prof. Dr. L. J. Gauckler, Korreferent



Zürich 1992

## Zusammenfassung

Moderne Strukturkeramiken erreichen Biege- und Zugfestigkeiten bis zu mehreren 100 MPa. Diese hohen Festigkeiten bleiben auch bei erhöhter Temperatur (bis ca. 1400° C) weitgehend erhalten. Gleichzeitig sind die meisten Keramiken sehr beständig gegen Korrosion und chemisch aggressive Medien. Diese Eigenschaften prädestinieren die Strukturkeramiken geradezu für den Einsatz in chemischen Anlagen, in Wärmekraftmaschinen und ähnlichen Bauteilen, welche hohen Temperaturen und Spannungen ausgesetzt sind. Infolge der grossen Sprödigkeit der Keramiken ist jedoch oft ein Verbund mit anderen Werkstoffen sowie eine sehr sorgfältige konstruktive Gestaltung notwendig, um die für die Keramik sehr gefährlichen Zugspannungen zu verhindern.

Die vorliegende Arbeit beschreibt, die Realisierung eines Stahl-Keramik-Verbundrohres für höchste Belastungen durch Innendruck und Temperatur, wobei das Schergewicht auf Aspekte der Berechnung und des Verbundverhaltens gelegt wird. Am Beispiel eines Fliegerabwehr-Waffenrohres werden die typischen Teilschritte der Entwicklung einer Keramik-Verbundkonstruktion aufgezeigt: Verbund mit Stahl zur Vorspannung der Keramik, ein- und mehrdimensionale Berechnung der auftretenden Spannungen und Temperaturen zur Optimierung der konstruktiven Gestaltung sowie Versuche zur Messung der auf das Bauteil wirkenden Beanspruchungen und einiger spezieller Eigenschaften der verwendeten Keramik.

Durch die fortlaufende Steigerung der Geschossgeschwindigkeiten und die damit verbundene Erhöhung der Pulververbrennungstemperaturen entstehen bei der Weiterentwicklung von konventionellen Fliegerabwehrwaffenrohren auf Stahlbasis ernsthafte Lebensdauerprobleme infolge von Aufschmelzen und erosivem Werkstoffabtrag an der inneren Oberfläche der Rohre. Um die Rohrlebensdauer zu erhöhen, wird deshalb im am höchsten beanspruchten, hinteren Rohrteil ein Büchse aus hochfester Strukturkeramik in einen massiven Stahlmantel eingeschrumpft. Die Keramikbüchse (Wandstärke  $\approx 3$  mm) wird dabei in radialer Richtung sehr stark auf Druck vorgespannt. Damit werden trotz des hohen Innendrucks während der Schussabgabe tangentielle Zugspannungen in der Keramik verhindert. Im Laufe der Entwicklung durchgeführte Beschussversuche und Berechnungen zeigten, dass zur Verhinderung von Rissen in der Nähe der Büchsenenden auch eine axiale Vorspannung der Büchsen notwendig ist.

Im ersten Entwicklungsschritt werden für die Werkstoffwahl und die Grobdefinition der Geometrie möglichst einfache Formeln zur schnellen Abschätzung der auftretenden Spannungen benötigt. Im Kapitel 2 werden zunächst am ebenen, dann rotationssymmetrischen Modell mittels Laplace-, bzw. Hankel-Transformation Formeln für die Wärmeausbreitung hergeleitet. Anschliessend wird das Spannungsproblem am Modell des mehrschichtigen und unendlich langen dickwandigen Zylinders gelöst. Im Hinblick auf

spätere, detailliertere Berechnungen werden zusätzlich gasdynamische Ueberlegungen zum Wärmeübergang im Rohr durchgeführt sowie ein Finite-Elemente Modell für die Temperaturberechnung entwickelt.

Zur Ueberprüfung und Anpassung der gasdynamischen Abschätzungen wurden in den Beschussversuchen Temperaturmessungen an den Verbundrohren vorgenommen. Infolge der im Vergleich zu den Vorgängen im Waffenrohr sehr trägen Messung mit Thermoelementen konnte trotz sehr aufwendiger Auswertung nur eine Aussage über die gesamte, pro Schuss in die Rohrwand fließende Wärmemenge gewonnen werden. Zusammen mit den gasdynamischen Abschätzung wird dadurch jedoch eine zuverlässige Temperaturberechnung ermöglicht (Kapitel 4).

Die Optimierung der Verbundkonstruktion bezüglich Geometrie und Werkstoffen verlangt eine ausführliche Spannungsanalyse. Entsprechende Finite-Modelle wurden entwickelt (Kapitel 6). In Beschussversuchen mit Siliziumkarbid- Büchsen aufgetretene Umfangsrisse im Randbereich konnten damit eindeutig auf mangelnde axiale Druckvorspannung zurückgeführt werden. Für die weiteren Versuche wurden die Büchsen auch axial vorgespannt, wodurch Umfangsrisse vermieden werden konnten. Im letzten Beschussversuch konnten mit Siliziumnitrid- und Syalonbüchsen Lebensdauern erreicht werden, die im Bereich der Lebensdauer konventioneller Stahlrohre liegen. Die Nachrechnung dieser Versuche zeigt, dass im Bereich der erreichten Lebensdauern die Vorspannung infolge der mit der Erwärmung verbundenen Dehnung des Stahlmantels stark abnimmt und so Risse in der Keramik auftreten können. Gleichzeitig stellt man fest, dass die Siliziumnitridrohre im Vergleich mit den Syalonrohren eher etwas höher belastbar sind.

Neben den Spannungen durch Innendruck und Wärmedehnung ist die Keramik vor allem durch den Thermoschock infolge der schnellen Erwärmung aus dem Rohrinne belastet. Innerhalb von Millisekunden fließen grosse Wärmemengen durch die Oberfläche. Um das Verhalten der Keramik bei derartiger Belastung näher zu untersuchen, wurde ein Thermoschockversuch entwickelt, wobei flache, vorgespannte Keramikproben mit einem Hochenergielaser schnell aufgeheizt werden (Kapitel 7). Erste Resultate deuten an, dass das Verhalten der Werkstoffe dabei nicht wie in der Kontinuumsmechanik üblich mit makroskopischen Werkstoffkennwerten beschrieben werden kann. Vielmehr werden mikroskopische Aufschmelz- und Rissbildungsvorgänge, welche sich vor allem im Bereich der Korngrenzen abspielen, für das Versagen der Keramik wichtig.

## Abstract

Laboratory measurements have shown that modern ceramics possess bending and tensile strengths of several hundred mega-Pascals which persist for high temperatures. They are also highly resistant to corrosion and chemically aggressive media. These features make ceramics highly attractive for use in situations where high temperatures and stresses are present. In practice however, ceramics are brittle and tensile stresses should be minimized. This is achieved in many cases by using a composite material. One of the components of this material is the ceramic and the composite is designed so that the tensile stresses are carried by the remaining components.

In this work we describe the different steps towards realizing a tube composed of steel and ceramic. The tube is subject to high internal pressures and temperature loads which produce various stresses and strains in the steel and ceramic. As an example of such a material we consider the gun barrel of an anti-aircraft gun. Using temperature measurements taken from this gun barrel, single and multi-dimensional models are used to determine the optimal parameters and working stresses for the design. In addition, experiments were performed to determine certain properties of the ceramic.

By the forthcoming increase of the bullet velocity, in connection with a raise of powder burning temperatures, lifetime problems arise by the further development of gun barrels on a conventional steel base. These lifetime decrease is caused by melting and wear on the inner surface of the barrel. To enhance the barrel lifetime, a cylinder of structural ceramics is shrunk into the most highly loaded rear part of the gun barrel. In radial direction, this ceramic cylinder (wall thickness  $\approx 3$  mm) is strongly prestressed to compression by a massive steel jacket. Due to this prestress, circumferential tensile stresses can be avoided despite the very high interior pressure during shooting. In course of the project development, field tests and calculations showed that also axial prestress is necessary to prevent cracks near the ends of the ceramic part.

The first part of this work outlines formulae based on Laplace and Hankel transformations which are used to yield estimates of the temperatures and stresses for such a composite structure. With the help of known models for gas dynamics, the temperature effects of exploding charge were also determined. These results in conjunction with a finite element model eventually to the thermal stresses in the composite construction.

To verify and calibrate the aforementioned models for the gas dynamics, measurements were performed on the gun barrel during an actual shooting. The gas and temperature dynamics which occurred take place on a time scale which is significantly smaller than the time resolution of our measurements. To overcome this difficulty many such experiments

were performed and the resulting data synthesized to determine the actual heat transfer history (Chapter 4).

Optimization of the design requires a detailed stress analysis. This was performed with the help of finite elements (Chapter 6). Field tests with a silicon carbide ceramic showed the presence of circumferential cracks. Calculations performed using the finite element model indicated that an initial axial pre-stress would eliminate this problem. Further tests on the ceramic-steel composite with the axial pre-stress verified our analysis. One of the features we wished to optimize was the life of the barrel. The critical phenomena in this case are the different expansion properties of the steel and ceramic components. This problem can be reduced significantly by selection of the appropriate steel-ceramic combination. Barrels designed using silicon nitride and Syalon have subsequently achieved lifetimes comparable to those of conventional steel barrels.

Asides from the stresses due to internal pressure and thermal heating, there is also the effects of the thermal shock to consider: a severe heating occurs on the inner surface of the barrel in the space of a few milli-seconds. To determine the effects of this thermal shock, a test was developed which exposed prestressed ceramic specimens to severe thermal gradients. A high energy laser was used to achieve the required high gradients (Chapter 7). The first results indicate that macro-material concepts are not sufficient to describe the observed behaviour. The phenomenon is highly dependent on micro-material behavior. Examples of such behavior are local crack initiation and melting which occur predominantly at the grain boundaries.