



Doctoral Thesis

Dynamische Rissausbreitung in Rohren

Author(s):

Spirig, Titus Hans

Publication Date:

1993

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000922239> →

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](#).

Diss. ETH Nr. 10195

Dynamische Rissausbreitung in Rohren

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels
DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von
TITUS HANS SPIRIG
Dipl. Bau. Ing. ETH
geboren am 7. September 1960
von Widnau SG

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. M. B. Sayir, Referent
Prof. Dr. D. Gross, Korreferent

ADAG Administration & Druck AG
Zürich 1993

Kurzfassung

Beim Bruch von Rohren unter Innendruck tritt das Phänomen auf, dass sich die Risse nicht geradlinig, sondern auf einer gekrümmten bzw. sich verzweigenden Rissstrajektorie ausbreiten. Diese Instabilitäten der Rissausbreitungsrichtung werden in dieser Arbeit experimentell und theoretisch untersucht.

Im *1. Kapitel* wird anhand eines Schadensfalles mit einem S-förmigen Rissverlauf an einem Wasserleitungsrohr gezeigt, wie es zu einem dynamischen Bruch kommt. Im weiteren werden die Grundlagen der linearelastischen Bruchmechanik dargestellt, soweit sie für die folgenden Untersuchungen von Bedeutung sind.

Im *2. Kapitel* wird ein Versuchsstand beschrieben, mit dem gerade, verzweigte und gekrümmte Risse in einem wassergefüllten Plexiglasrohr generiert werden können. In den Bruchexperimenten an den Rohren wird die Rissgeschwindigkeit, das Dehnungsfeld und der Innendruck gemessen. Die Materialkennwerte der verwendeten Plexiglasrohre werden experimentell bestimmt. Eine Analyse der experimentellen Resultate zeigt, dass die Mechanismen, welche zu einem verzweigten oder gekrümmten Rissverlauf führen, völlig verschieden sind.

Vorgängig zu den theoretischen Untersuchungen der verzweigten und gekrümmten Rissbahnen wird im *3. Kapitel* der radiale Stoss auf ein Rohr und die damit verbundene Wellenausbreitung analytisch und experimentell untersucht. Dies ist notwendig, da die dynamische Rissausbreitung immer mit Wellenausbreitung gekoppelt ist. Die Beobachtung der Wellenausbreitung zeigt eine Kopplung zwischen der Biegewelle in Längsrichtung und der Membranwelle in Umfangsrichtung. Dieser Sachverhalt ist bei der Analyse der gekrümmten Rissbahn von besonderer Bedeutung.

Im *4. Kapitel* wird der verzweigte Riss untersucht. Die Messung der Dehnungen auf der Rohrinnen- und Rohraussenseite lassen nur Membranwellen vor und während dem Rissdurchgang erkennen. Der gemessene Druckverlauf zeigt, dass der Rohrinrendruck erst nach dem Rissdurchgang absinkt. Diese Resultate zeigen, dass sich der Riss im Rohr analog verhält wie in einer unendlich grossen, gezogenen Scheibe. Er "merkt" nichts von der Schalenkrümmung, da die Rissgeschwindigkeit so gross ist, dass sich keine Biegewellen vor der Rißspitze ausbilden können. Der

Rissvorgang kann deshalb an einer halbumendlichen Scheibe unter Zugbelastung, welche der Umfangsspannung des Rohrs unter Innendruck bei Beginn der Rissausbreitung entspricht, studiert werden. Die Experimente lassen eine starke Druckspannung in Rissrichtung erkennen. Dieser sogenannte nichtsinguläre Spannungsterm $\sigma_{\theta x}$ muss im Verzweigungskriterium berücksichtigt werden.

Das 5. *Kapitel* behandelt die gekrümmte Rissbahn. In diesem Fall eilen die Membran- und Biegewellen sowie der Druckabbau der Reißspitze voraus. Die Biegewelle in axialer Richtung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Instabilität der Rissausbreitungsrichtung. Mit einem Balkenmodell lässt sich zeigen, dass diese Biegewelle in axialer Richtung durch den Druckabbau induziert wird. Mit einem Zylindermodell lassen sich die komplexen Vorgänge analytisch beschreiben. Ausgehend von diesem Modell wird ein Stabilitätskriterium für den Ort der Risskrümmung formuliert und an einem Experiment verifiziert.

Abstract

During the fracture of pressurized pipes it is possible that the crack path is not straight instead it may be either curved or branched. An experimental and theoretical investigation of these two types of crack propagation paths is subject of this dissertation.

The *1st chapter* of this thesis provides a brief description of the occurrence of an S-shaped crack in a pressurized water pipe, and discusses how dynamic fracture can occur. A review of certain elements of linear-elastic fracture mechanics is also contained in this chapter. These results will be employed in subsequent chapters.

A description of the experimental apparatus used to generate straight, curved or branched crack paths in a water filled PMMA-pipe is contained in *chapter 2*. This apparatus is designed to measure the crack tip speed, strain field and internal pressure during the crack propagation. The elastic properties of the PMMA-pipe are measured in a separate experiment. Experimental results in this section show that two distinct mechanisms produce the curved and branched crack paths.

As a precursor to the theoretical investigation of the curved and branched crack paths, the wave propagation due to a radial impact on a cylinder is investigated in *chapter 3*. This analytical study is necessary because of the inter-relationship between dynamic crack and wave propagations. It shows the coupling of a bending wave which propagates axially and a membrane wave which propagates circumferentially. This coupling will be of significant interest in the analyses of the curved crack path.

The branched crack is investigated in the *4th chapter*. Strain measurements on the inner and outer surface of the pipe show the presence of membrane waves only prior to and as the crack tip passes the location of the particular strain gauges. Furthermore, pressure measurements indicate a decrease in the internal pressure in the wake of the crack tip. These characteristics are qualitatively identical to those observed in the crack propagation in an infinite plate under tension. Because the crack speed is larger than the bending wave speed, the crack propagation is un-influenced by the bending waves produced by the impact. Consequently the crack propagation is un-affected by the curvature of the pipe. Motivated by these results,

the crack propagation is analyzed further by considering a semi-infinite plate under tension. The tension in the plate equals the hoop-stress in the pressurized pipe prior to crack propagation. These results show a large compressive stress along the crack direction. This so called non-singular stress term σ_{0x} must be included in the branching criterion.

In the *final chapter* the curved crack trajectory is discussed. Here the membrane and bending waves as well as the pressure decay propagate faster than the crack tip. It is shown that the axial bending wave has a significant influence on the shape of the crack path. A qualitative model of a beam on an elastic foundation is used to show that the bending wave occurs because of the depressurization of the water in the pipe. Using a “cylindrical model” the complex mechanism behind curved crack propagation is described analytically. From this model a stability criterion for the location of the crack curving is formulated and compared with experimental results.