

Schadensfallanalyse an Kunststoffbauteilen

C. Bierögel, B. Langer*, H. Müller**, W. Grellmann,

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Werkstoffwissenschaft, D-06099 Halle (Saale)

* Institut für Polymerwerkstoffe e. V., D-06217 Merseburg

** Polymer Service GmbH Merseburg, D-06217 Merseburg

1 Einleitung

Für die Erforschung des Versagens von Bauteilen und die nachfolgende Einleitung präventiver Maßnahmen zur Sicherung der Qualität und der Lebensdauer wird auch bei Kunststoffen die Schadensfallanalyse verwendet. Für diese Analyse steht bei Kunststoffen ein breites Spektrum an makroskopischen und mikroskopischen Methoden der Kunststoffprüfung und Kunststoffdiagnostik zur Verfügung. Kunststoffbauteile unterliegen während des Einsatzes oftmals sehr komplexen mechanischen, thermischen und medialen Beanspruchungen, die in Verbindung mit Alterungs- und Degradationseffekten zum Versagen des Bauteils führen können. Da speziell die mechanischen Eigenschaften bei Kunststoffen wesentlich stärker als bei metallischen Werkstoffen durch die Temperatur und die Zeit beeinträchtigt werden, ist diesen Einflussfaktoren in Verbindung mit dem herstellungsbedingten inneren Zustand besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Erfahrungen zeigen, dass das Versagen oftmals nicht im spezifischen Materialverhalten der Kunststoffe, sondern in einer nicht werkstoffgerechten Konstruktion und Dimensionierung begründet ist [1].

Die Vielzahl möglicher Herstellungsverfahren, die breite Palette möglicher Modifikationen sowie der Einsatz von Füll- und Verstärkungsstoffen, sowie Additiven und Stabilisatoren bedingt im praktischen Einsatz unterschiedlichste Versagens- und Schädigungsmechanismen, welche die funktionale Integrität des Bauteils erheblich beeinflussen können. Infolge der vorhandenen Kriechneigung der Kunststoffe und den auftretenden Relaxationsbedingungen kann in Verbindung mit dem Eigenspannungs- und Orientierungszustand sowie dem viskoelastischen Verformungsverhalten entweder eine plastischen Instabilität mit unzulässig großen Deformationen oder instabile Rissausbreitung auftreten [2].

Die in der Schadensfallanalyse an Kunststoffen eingesetzten Prüfmethode müssen deshalb immer eine hinreichende Struktursensibilität besitzen, um gesicherte Aussagen zur Versagensursache zu zulassen und erfordern deshalb immer eine mehrparametrische Beschreibung des Zustandes des Bauteils. Gleichzeitig ist hier aber auch festzustellen, dass viele einfache technologische Prüfverfahren oder die visuelle Beurteilung des Schädigungszustandes nicht zu unterschätzende Hilfsmittel bei der Bewertung von Schadensfällen darstellen, da sie zumeist nur einen geringen prüftechnischen Aufwand verursachen [3]. Besondere Bedeutung besitzt in diesem Zusammenhang auch die Präparation geeigneter Prüfkörper aus dem zu untersuchenden Bauteil, da durch unsachgemäße Prüfkörperentnahme oder -bearbeitung erheblicher Einfluss auf die Aussagefähigkeit nachfolgend ermittelter Werkstoffkenngrößen ausgeübt werden kann [4].

An ausgewählten Beispielen (Laugenbottich von Waschmaschinen, Schweißnähten von Wasserverteilern und einer Laugenrohrleitungen aus Guss-Polyamid) soll die typische Vorgehensweise bei der Schadensfallanalyse an Kunststoffbauteilen erläutert werden, spezifische charakteristische Eigenschaftsmerkmale dargestellt werden und die Aussagemöglichkeiten der genutzten Prüfmethode diskutiert werden.

2 Ursachen der Rissentstehung an den Lagerbuchsen von Laugenbottichen

Die Laugenbottiche von Waschmaschinen (Bild 1) werden heute zumeist aus kurzglasfaserverstärkten Polypropylenwerkstoffen hergestellt, da diese Materialien über eine gute Festigkeit und Steifigkeit, hohe Beständigkeit gegenüber medialer Beanspruchung und eine hinreichende thermische Stabilität verfügen [5]. Diese vergleichsweise großen Kunststoffbauteile werden im Spritzgießverfahren mit zentralem Anguss an der Position der Motorwelle hergestellt, wobei die Lagerbuchse aus Gusseisen umspritzt wird. Im Betriebszustand werden diese Laugenbehälter durch me-

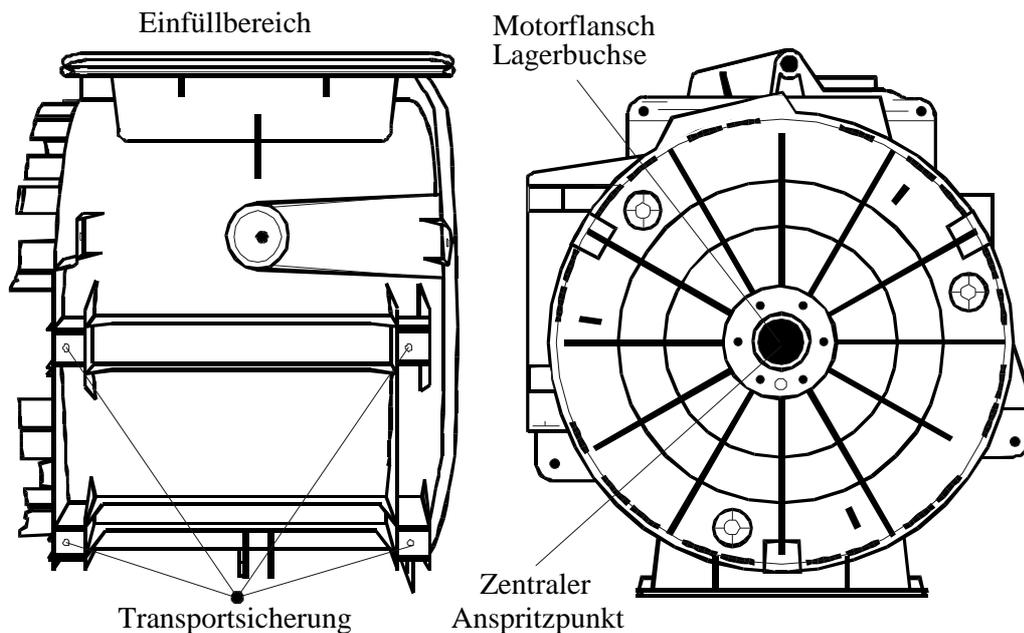


Bild 1: Schematische Darstellung des Laugenbottichs einer Toplader-Waschmaschine.

dial-thermische Wechselbelastung und durch den Wasch- und Schleudervorgang einer komplexen Beanspruchung ausgesetzt, die im Bereich der Lagerbuchse der Motorwelle Risse mit der Gefahr von nachfolgenden Leckagen verursachte. Diese radialen Anrisse (Bild 2) entstehen direkt an der inneren Kante der umspritzten Lagerbuche und breiten sich entlang der Radialrippen in Richtung der Außenwand des Behälters aus, wobei die Ursachen der Rissinitiierung in einer Schadensanalyse geklärt werden sollten. Da bei der visuellen Inspektion in der Nähe des Ortes der Rissentstehung bei

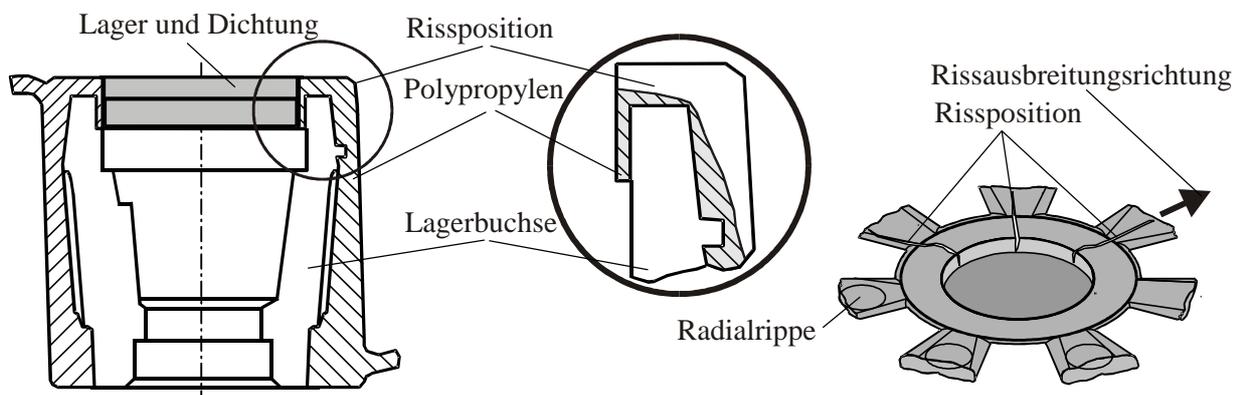


Bild 2: Position der Anrisse im Bereich der Lagerbuchse und Rissausbreitungsrichtung.

frisch gespritzten Laugenbottichen weiße senkrechte Linien am Innenrand der Buchse beobachtet wurden (Bild 3), sollte eine mikrostrukturelle Bewertung der Schlißflächen Aussagen über die Faserorientierung und eventuelle Fehlstellen geben. Zur Beurteilung des inneren Zustandes im Bereich der Lagerbuchse, speziell zur Aufklärung eventuell vorhandener Bindenähte, wurde eine partielle Füllstudie durchgeführt und dem kurzglasfaserverstärkten Polypropylen in geringen Mengen Farbstoffpartikel zugegeben. Aus den Schlißbildern konnte entnommen werden, dass die Orientierung

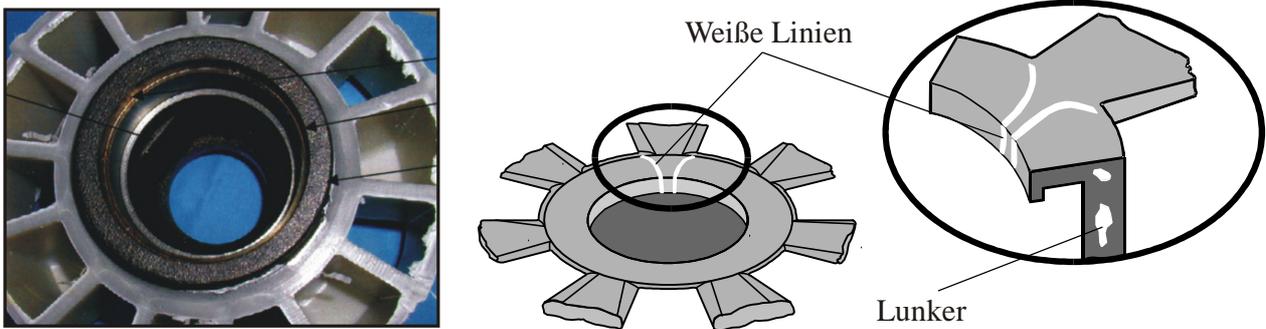
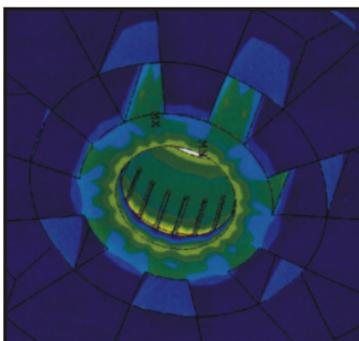


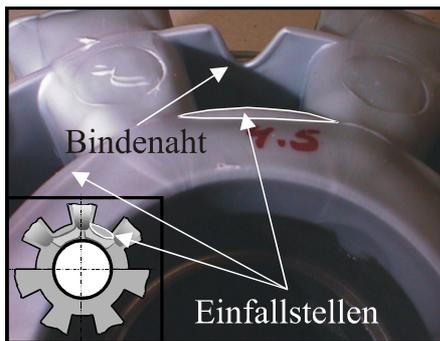
Bild 3: Position der weißen Linien im Bereich der Lagerbuchse und auftretende Lunker an der Seitenwand der Buchse.

der Glasfasern bedingt durch den zentralen Anguss vorzugsweise in der radialen Richtung auftritt. Die gleichzeitig beobachteten Lunker in der Seitenwand direkt neben der metallischen Lagerbuchse wirken sich nicht festigkeitsmindernd aus und werden durch die Wanddickenübergänge von 4 mm bis zu 12 mm und die damit verbundenen hohen Eigenspannungen infolge des verzögerten Abkühlvorganges verursacht. Durchgeführte FEM-Simulationen des Abkühlprozesses (Bild 4a) belegen, dass direkt am Rand der umspritzten Lagerbuchse die Tangentialspannungen ihr Maximum erreichen und damit die realisierte Faserorientierung in diesem Bereich nicht festigkeitssteigernd wirkt, d.h. die Fasern liegen nicht parallel zur Hauptbelastungsrichtung. Die durchgeführten Füllstudien am Spritzgusswerkzeug (Bild 4b) belegen, dass an der Außenseite der Buchse hohe Eigenspannungen auftreten, deren Ursache die schnelle Abkühlung am Metalleinlegeteil ist. Diese äußern sich hier in Einfallstellen und bewirken am kompletten Kunststoffbauteil eine zusätzliche Erhöhung der Tangentialspannungen. Die mit zusätzlichen Farbpartikeln (Zweifarbenspritzguss) hergestellten Laugenbehälter wiesen an der identischen Position der weißen Linien ebenfalls farbliche Unstetigkeiten der Oberfläche auf (weiße Linien im Bild 4c). Es ließ sich damit nachweisen, dass in der Nachdruckphase das vorher an der Wand eingefrorene Polypropylen erneut aufgeschmolzen wird und damit Bindenähte mit verringertem mechanischen Eigenschaftsniveau (Faktor 2 - 3) entstehen.

a) FEM-Simulation



b) Werkzeug-Füllstudie



c) Zweifarbenspritzguss

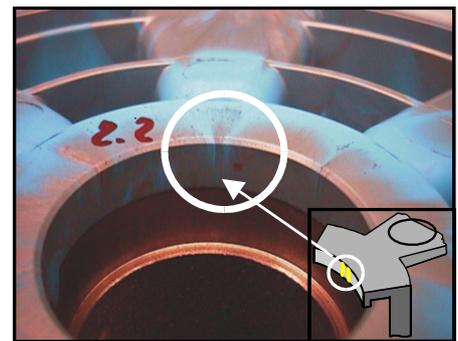


Bild 4: a) Finite-Elemente-Simulation, b) Studie zum Füllverhalten des Werkzeugs und c) Zweifarbenspritzguss

Als Ursachen der Rissentstehung und -ausbreitung im Bereich der Lagerbuchse der Laugenbehälter sind demzufolge die nachstehenden Effekte verantwortlich:

- Durch die Schwindung des Polypropylens während des Abkühlprozesses und das Aufschrumpfen auf die metallische Lagerbuchse entstehen Radial- und Tangentialspannungen.
- Infolge der behinderten Ausdehnung wird am Innenrand der Lagerbuchse eine hohe Tangentialspannung erzeugt, die an der scharfen Kante der Lagerbuchse ihr Maximum erreicht.
- Durch die konventionelle zentrale Strangangussgestaltung entsteht ein radialer Materialfluss, der im Bereich der Lagerbuchse eine falsche Orientierung der Glasfasern bezüglich der Hauptbeanspruchungsrichtung erzeugt.
- Durch die vergleichsweise großen Wanddickensprünge werden ein hoher Eigenspannungszustand und Bindenähte an der Innenwand der Buchse hervorgerufen.
- Bei zähen Werkstoffen kann der Lastspannungsabbau über lokale Dehnungsprozesse erfolgen, wogegen bei spröden Materialien oder tiefen Temperaturen dieser Effekt durch eine Rissinitiierung und nachfolgende Rissausbreitung erreicht wird.

Als Konsequenz dieser Versagensursachen wurden die Radien im Bereich der Lagerbuchse vergrößert (Bild 5a), um die vorhandenen Spannungsspitzen zu verringern und eine Beheizung der metallischen Buchse (Dornbereich) vorgenommen (Bild 5b), wodurch gleichzeitig eine bessere Nachdruckwirksamkeit und die Verringerung der Eigenspannungen resultierte. Durch eine veränderte Angussgestaltung mit radialen Anschnitten (Bild 5c) wurde ein partiell tangentialer Materialfluss während der Formfüllung realisiert, wodurch eine optimalere Faseroptimierung bezüglich der Tangentialspannung erreicht wurde.

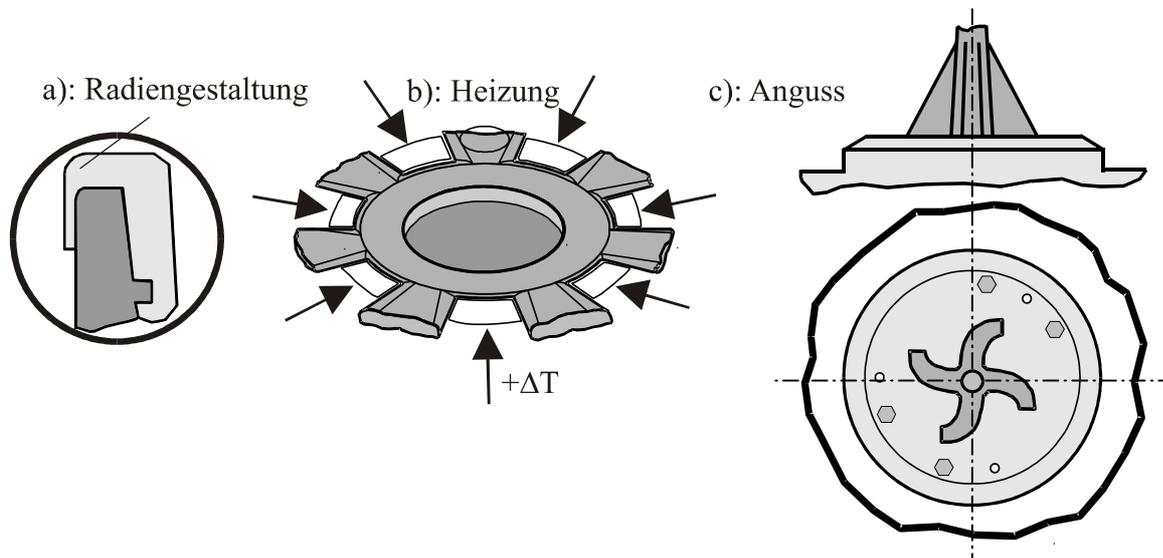


Bild 5: a) Veränderung der Radien, b) Vorheizung der Lagerbuchse c) Veränderung der Angussgeometrie

Grundsätzlich ist festzustellen, dass die Ursachen des Versagens dieses Kunststoffbauteils durch konstruktive Fehler und nicht werkstoffgerechte Dimensionierung und nicht optimierte Verarbeitungsprozesse verursacht wurde. Infolge der realisierten Maßnahmen wurde das Auftreten von Rissen und Leckagen an diesem Laugenbehälter nicht mehr beobachtet, wobei Änderungen der Geometrie des Laugenbottichs oder des eingesetzten Werkstoffes durchaus neue Probleme verursachen können, die der gezielten Untersuchung des Festigkeits- und Deformationsverhalten bedürfen.

3 Ursachen von Rissen an der Schweißnaht von Wasserverteilern aus PE

Als Werkstoff für Wasserverteiler wird aufgrund der sehr guten medialen Beständigkeit gegenüber Chlor und der relativ geringen Temperaturen während des Betriebs Polyethylen eingesetzt. Diese Verteiler, die in der Regel über einen größer dimensionierten Zufluss und mehrere Abflüsse verfügen werden normalerweise im Bereich bis zu 3,1 bar betrieben. Die Dimensionierung erfolgt dabei aus Sicherheitsgründen bis zu einem Druck von 6 bar, um mögliche Druckspitzen während Zu- und Abschaltprozessen abfangen zu können. Die Herstellung derartiger Druckwasserverteiler erfolgt dabei so, dass ein extrudiertes Polyethylenrohr hinreichenden Durchmessers und Wanddicke an den Enden mit einem Deckel aus identischem Werkstoff verschweißt wird. In diesem Fall betrug die Nennweite des Rohrs 560 mm und die Wanddicke war einheitlich 30 mm (Bild 6). Im Bereich einer

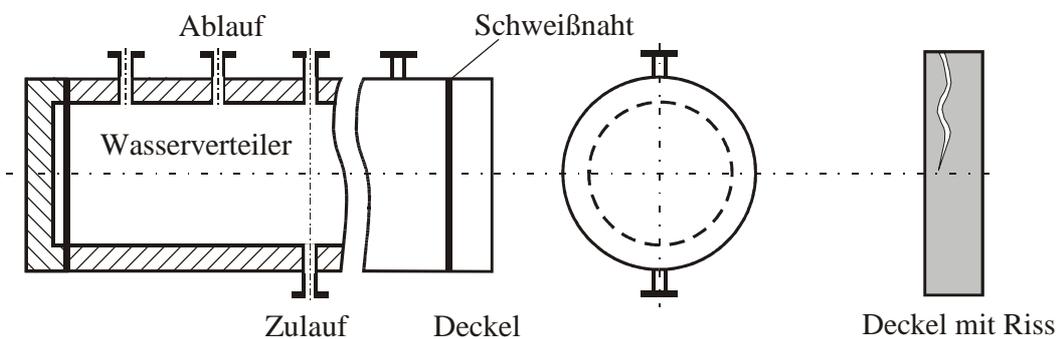


Bild 6: Schematische Darstellung des Wasserverteilers und des rissbehafteten Deckels

Schweißnaht trat nach relativ kurzer Betriebsdauer Wasser aus. Die Schliffbilder im Umfeld der Schweißnaht zeigten, dass die Rissinitiierung von der Innenseite des Rohrs ausging (Bild 7a). Die Ursache für diese Leckage war eine nicht werkstoffgerechte Ausführung der Stumpfschweißnaht. Infolge der zu geringen Deckelseitenlänge und des Anpressdrucks erzeugte die resultierende Schweißnahtwulst im Inneren des Verteilers einen spitzen Kerb (Bild 7b) in dem Bereich, in dem die größten lokalen Spannungen während der Wasserdruckschwankungen auftreten. Die Überlagerung mit dem statischen Biegemoment durch die Wulst initiierte den Riss und nachfolgend die Leckage des Wasserverteilers.

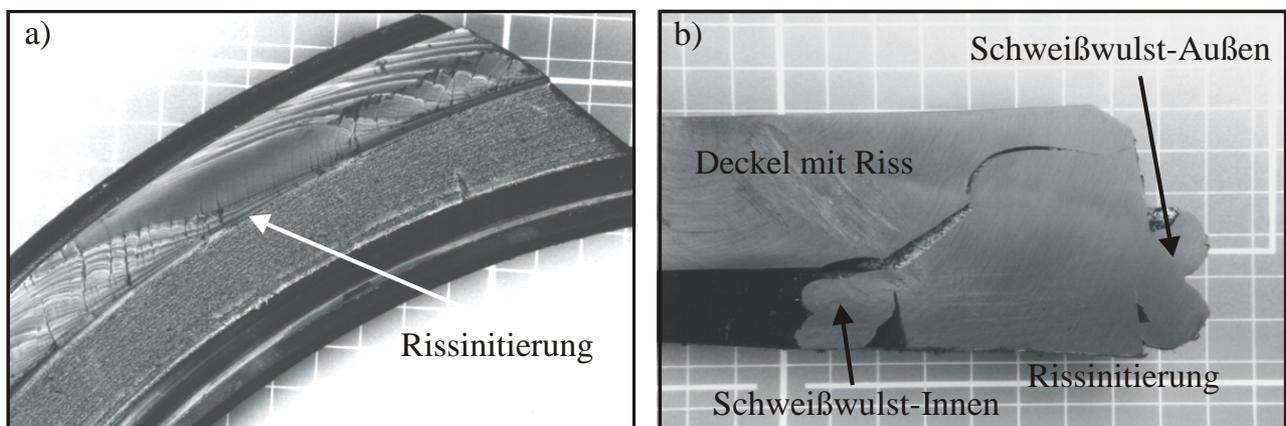


Bild 7: Fehlerursachen der Leckage an Polyethylen-Wasserverteilern

4 Untersuchung von Gewaltbrüchen an Gusspolyamid-Rohren

In Rohrleitungen aus Gusspolyamid (Bild 8a) mit einem Durchmesser von einigen Dezimetern traten nach einigen Monaten des Einsatzes als Wasser- bzw. Laugenleitung Gewaltbrüche unterschiedlicher Art auf, obwohl eine hinreichende Sicherheitsreserve bei der Dimensionierung eingeplant wurde. Dabei erfolgte das Versagen der horizontalen Rohrleitung entweder durch den Bruch in der Nähe eines der Flansche (Bild 8b) oder durch ein- oder beidseitige Längsrisse (Bild 8c).

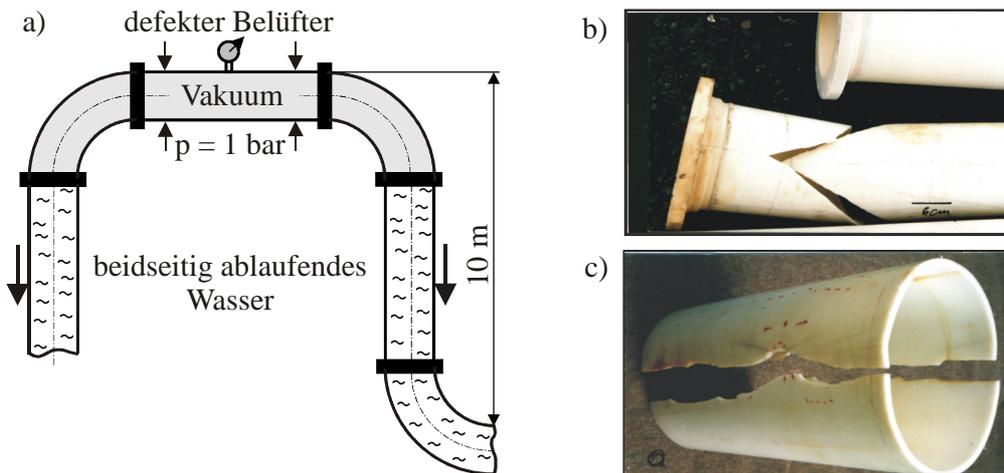


Bild 8: a) Schematische Darstellung der Rohrleitung, b) Bruch durch Knickinstabilität, c) Bruch durch Beulung.

Als bruchauslösende Ursachen konnten werkstoffseitige und auslegungsbedingte Fehler bei der Dimensionierung dieser Rohrleitungen nachgewiesen werden. Durch die Untersuchung des Konditionierungszustandes der gebrochenen Polyamid-Rohre wurde deutlich, dass Eigenschaftsunterschiede zwischen der inneren und der äußeren Rohrzone existieren, welche auf die Wasseraufnahme des Gusspolyamids im Rohrinernen zurückzuführen sind. Andererseits wurden als direkte bruchauslösende Faktoren die Beulung und Knickung des Rohres unter den gegebenen Einsatzbedingungen festgestellt, was durch das beim Rücklaufen des Wassers verursachte Vakuum und die unterschiedliche Dehnung des Rohrs infolge der Quellung bei Wasseraufnahme hervorgerufen wird. Je nach Dominanz einer dieser Effekte wird dann eine Beulungs- (Bild 8c) oder Knickungsinstabilität (Bild 8b) den Bruch der horizontal angeordneten Rohrleitung verursachen.

Literatur

1. *Materials Science of Polymers for Engineers* (Eds.: G. Menges, T.A. Oswald), Carl Hanser Verlag, München Wien, **2003**.
2. *Deformation und Bruchverhalten von Kunststoffen* (Hrsg.: W. Grellmann, S. Seidler), Springer, Berlin Heidelberg, **1998**.
3. *Kunststoff-Schadensanalyse, Methoden und Verfahren* (Ed.: G.W. Ehrenstein), Carl Hanser Verlag, München Wien, **1992**.
4. *Kunststoffprüfung* (Hrsg.: W. Grellmann, S. Seidler), Carl Hanser Verlag, München Wien, **2005**.
5. *Deformation and Fracture Behaviour of Polymers* (Eds.: W. Grellmann, S. Seidler), Springer, Berlin Heidelberg, **2001**.