

Kunststoffleitungen im Hochdruckbereich

Sicherheit und Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu Stahlleitungen

Plastic pipes for high-pressure service

Safety and cost-effectiveness vis-à-vis steel pipes

Kunststoffleitungen werden in absehbarer Zeit auch in Dimensionen und Druckstufen geliefert, wie sie im Transportbereich üblich sind (bis zu DN 500 und PN 150). Technisch ist dieses möglich, weil Armierungen mit Aramid zu diesen hochfesten Konstruktionen führen.

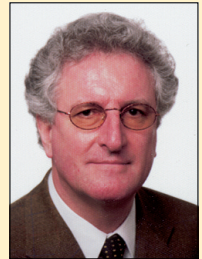
Wenn das gleiche Sicherheitsniveau erreicht werden soll, das heute für Stahlleitungen durchgängig garantiert ist, so müssen Versuchs- und Nachweiskonzepte entwickelt werden, die einerseits wirtschaftlich tragbar sind und andererseits zu belastbaren Aussagen führen.

Es werden Untersuchungswege aufgezeigt, die diese Anforderungen erfüllen und einen direkten Vergleich zwischen Stahlleitungen und Kunststoffleitungen aufzeigen.

In the foreseeable future, plastic pipes will become available in dimensions and for pressure levels customary in the transmission field (up to DN 500 and PN 150). This is technically possible because aramide reinforcing systems permit such high-strength designs.

Test and verification concepts which are, on the one hand, economically viable and, on the other hand, produce reliable information, must be developed if the same level of safety as is nowadays universally guaranteed for steel piping is to be achieved.

Test methods which meet these requirements and delineate a direct comparison between steel and plastic pipes are examined.



Dr.-Ing. Manfred Veenker

Dr.-Ing. Veenker Ingenieurgesellschaft mbH,
Hannover; Tel. 0511/28499-0,
E-Mail: mail@veenkermbh.de

Kunststoffe erobern zunehmend den Bereich hochfester Werkstoffe. Durch die Verfügbarkeit von Aramid sind in den letzten Jahren Kunststoffleitungen entwickelt worden, die bei üblichen Durchmessern der Transport- und Verteilsysteme die dort herrschenden Drücke tragen können.

Dabei gibt es biegeschlaffe Gewebe, die aus Aramid oder aus anderen hochfesten Materialien hergestellt werden und die als Schläuche in Altleitungen eingezogen werden können. Sie werden mit diesen Leitungen verklebt oder lose in diesen Altleitungen betrieben. Produkte mit der Nenndruckstufe von bis zu 40 bar stehen vor der Markteinführung.

Weiterhin gibt es handelsübliche PE-Rohre, die auf der Außenseite durch Aramid-Wicklungen verstärkt sind. Hier sind Nenndrücke von über 100 bar bei Durchmessern bis zu DN 500 verfügbar.

Im Folgenden sollen nicht die biegeschlaffen Schläuche, sondern nur die bewehrten Kunststoffrohre (Reinforced Thermoplastic Pipe – RTP) betrachtet werden. Die Innenschale besteht aus einem herkömmlichen PE-Rohr, das für die Rohrsteifigkeit und die Dichtigkeit zuständig ist, und dieses Innenrohr ist – entsprechend der Tragfähigkeit – mit

mehreren Lagen Aramidfasern umwickelt. Die Aramidfasern können entweder lose liegen oder in einer Matrix fixiert sein. Außen trägt das Rohr eine ca. 5 mm dicke Schutzschicht aus PE, die Schutzfunktion gegen äußere Einflüsse bewirkt und bei einigen Herstellern zur Aufnahme der Verbindungsmittel dient.

Als Verbindungsmittel werden Muffenschweißverbindungen, Einschraubhülsen oder Quetschverbinder eingesetzt. Abhängig vom Rohrdurchmesser und der Anzahl der Bewehrungslagen können diese Leitungen entweder „endlos“ gefertigt und als Rollbunde ausgeliefert wer-

den oder in Abschnittslängen transportiert werden. Die üblichen Abschnittslängen betragen etwa 12 bis 24 m.

Die wichtigsten Elemente dieses Rohrsystems sind in **Bild 1** aufgezeigt.

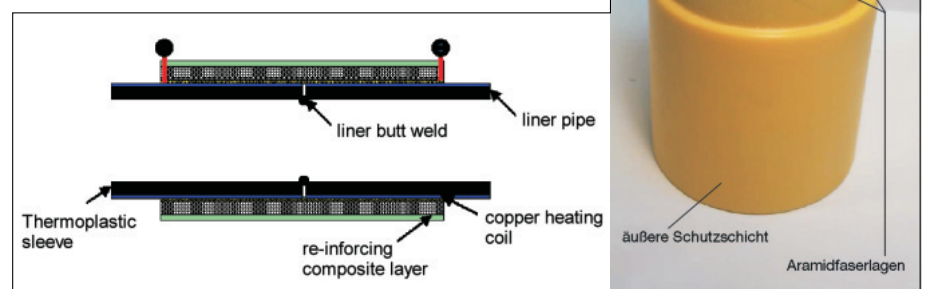


Bild 1: Darstellung eines aramidbewehrten Kunststoffrohres (Werkbild der Firma Wellstream) und Schnitt durch ein Verbindungsstück (Elektroschweißmuffe der Firma Pipelife)

Fig. 1: View of an aramide-reinforced plastic pipe (Wellstream works photo) and section through a connecting element (Pipelife electro-welding socket)

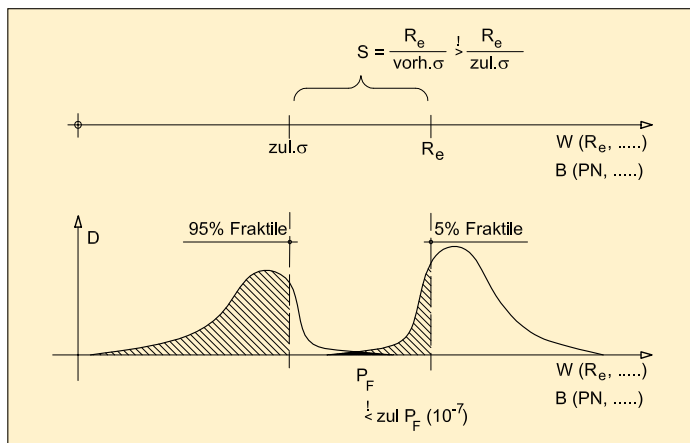


Bild 2: Sicherheitskriterien unter deterministischen (zul. σ) und probabilistischen (zul. P_F) Vorgaben

Fig. 2: Safety criteria and deterministic (allowable σ) and probabilistic (allowable P_F) specifications

Der Hauptvorteil dieses Leitungssystems ist neben der hohen Flexibilität, dass es bei gleichen Festigkeiten und Druckstufen wie Stahlleitungen keinerlei Korrosionsprobleme gibt und somit z.B. Rohöl, Nassgas und andere kritische Fluide transportiert werden können, und auch die Aussenkorrosion keine Rolle spielt, so dass die mit den Korrosionsschutz verbundene Kosten entfallen.

Die bewehrten Kunststoffrohre liegen heute noch bei den Kosten im Vergleich zum Stahl deutlich höher. Durchgeführte Analysen zeigen aber, dass beim Einsatz von neuen kostengünstigen Verlegeverfahren (Pflügen, Fräsen) bei RTP-Rohren die Gesamtkosten in der Nähe der Kosten für eine Stahlpipeline liegen können.

Obwohl diese Rohre im Ausland – insbesondere bei der Ölförderung – schon zur Standardeinrichtung gehören, ist dieser Leitungstyp in Deutschland noch weitgehend unbekannt. Ein erstes Projekt ist in Deutschland Anfang 2000 für den Transport von ungetrocknetem Sauer gas ausgeführt worden. Die Teststrecke beträgt etwa 1,0 km, und die Kunststoffleitung mit dem Innendurchmesser 3" wurde in das bestehende Stahlrohr als Inliner eingezogen.

Marktsituation und Sicherheitsanforderungen

Stahlleitungen stellen heute das Standardverfahren beim Bau von Gastransportleitungen dar. In der Gasverteilung werden dagegen bis zu einem Betriebsdruck von 4 bar überwiegend Kunststoffleitungen aus PE eingesetzt. Der Druckbereich von > 4 bar bis 10 bar ist für PE-Rohre technisch möglich, hat aber kunststoffseitig noch keine große Marktbedeutung.

- Insbesondere
- die hohe Flexibilität des Werkstoffes,
 - das geringere Gewicht gegenüber Stahl,
 - die einfache Verschweißbarkeit mit standardisierten Schweißautomaten,

- die Abwesenheit von Korrosion,
- das bei den Neuentwicklungen verbesserte Zeitstandverhalten des Materials

fürten im 4-bar-Bereich der Versorgungswirtschaft zum Ablösen des Rohr systems aus Stahl. Statistiken des DVGW belegen diese Entwicklung und weisen anhand der Unfall- und Schadensstatistik nach, dass dieser Werkstoff sicherheitstechnisch bei ordnungsgemäßer Verlegung alle Anforderungen erfüllt. In Kombination mit neuen Verlegeverfahren, wie z. B. dem Einpflügen von Leitungen oder einer grabenlosen Verlegung, sind Versorgungsgebiete kostengünstig zu erschließen. Hierbei werden lange Rohrstrecken in einem Arbeitsgang eingebracht. Insbesondere die Rohreigenschaften Flexibilität und leichtes Gewicht werden hierbei genutzt.

Diese vorgenannten Vorteile auch im Gastransportbereich nutzen zu können, ist mit einschichtig aufgebauten PE-Rohren nicht möglich. Die Druckfestigkeit ist bei noch wirtschaftlicher Rohrwanddicke technisch nicht erreichbar.

Der ausländische Markt bietet mit dem RTP hierfür alternativ mehrschichtig aufgebaute Kunststoffrohre an. Eine allgemeine Zulassung für den Gasbereich in Deutschland liegt noch nicht vor. Die bereits zitierten Analysen zeigen aber schon mögliche Einsatzbereiche auf und führten bei Gastransportgesellschaften zur Entscheidung, diesen Werkstoff gemeinsam mit Rohrproduzenten unter Einbindung von Genehmigungsbehörden allgemein zugelassen zu bekommen. Diese Rohre können als Inliner zur Sanierung von erdverlegten Rohrleitungen und Dükkern, aber auch im Durchmesserbereich bis DN 200 für Neuverlegungen heute schon eine wirtschaftliche Alternative zu einer Stahlrohrlösung darstellen.

Neben der reinen wirtschaftlichen Betrachtung eines Gesamtsystems sind vor einem generellen Einsatz von neuen Produkten ingenieurtechnische Betrachtun-

gen, unterstützt durch Messungen, durchzuführen. Hierbei sind neben materialtechnischen Untersuchungen auch die durch die Verlegeart auftretenden Belastungen zu untersuchen. Dieses Anforderungsprofil sollte für einen neuen Werkstoff gemeinsam mit allen am Produkt beteiligten Partner erarbeitet werden, wobei die Grundsatzuntersuchungen vom Rohrproduzenten durchzuführen sind. Insbesondere Fragen hinsichtlich

- der Auslegung,
- des Zeitstandverhaltens des Rohres bzw. des Rohrsystems mit Verbinder,
- der Umweltverträglichkeit,
- einer sicherheitstechnischen Gesamtbewertung des Systems gegenüber Stahl,
- der Anforderungen der geltenden technischen Regeln

sind vor einem allgemeinen Einsatz zu klären.

Vor einem generellen Einsatz von neuen Materialien im Gastransport sollten alle vorgenannten Fragen diskutiert und letztendlich zufriedenstellend beantwortet werden. Hierzu ist eine zielgerichtete Zusammenarbeit zwischen Rohrproduzent und Versorgungswirtschaft erforderlich. Nur so lassen sich unter den veränderten Gasversorgungsbedingungen für den Kunden wirtschaftliche Gesamtlösungen erarbeiten, die wiederum die Basis für eine zukunftsorientierte Gasversorgung darstellen können.

Definition der Sicherheit

Ein Grund für die Zurückhaltung deutscher Betreiber von Hochdrucknetzen beim Einsatz von armierten Kunststoffrohren liegt darin, dass neben dem (noch) hohen Preis eine durchgängige, abgesicherte Sicherheitsaussage und Qualitätssicherung noch nicht gegeben ist und im Einzelfall erarbeitet und überprüft werden muss.

Im Folgenden soll deshalb aufgezeigt werden, wie Sicherheit und Qualität bei neuen Produkten definiert und ihre Einhaltung überprüft werden können.

Sicherheit ist keine absolute, sondern eine relative Größe. Nur wenn der wirtschaftliche Aufwand gegen unendlich geht, kann eine Schadensrate „null“ erreicht werden. In den letzten Jahren hat es in Deutschland eine intensive Diskussion über deterministische und probabilistische Sicherheitskonzepte gegeben. Es konnte der Eindruck entstehen, dass es sich um vollständig unterschiedliche Konzepte handelte.

Eine intensivere Beschäftigung mit diesem Thema zeigt, dass zwischen deterministischem und probabilistischem Sicherheitskonzept überhaupt kein Unterschied besteht, da beide vielmehr ineinander überführbar sind. In **Bild 2** ist zunächst das

deterministische Sicherheitskonzept dargestellt, das zum Beispiel für Stahl einen Sicherheitsfaktor von $S = 1,5$ gegen das als „gefährlich“ definierte Fließen verlangt. In Wirklichkeit gibt es nicht eine Fließspannung oder eine vorhandene Spannung, sondern diese Größen unterliegen Streuungen, die durch Dichtefunktionen beschrieben werden, wie im zweiten Teil des Bildes dargestellt. Dort, wo die Dichtefunktion der Belastungsseite (vorhandene Spannung) und die Dichtefunktion der Widerstandsseite (Fließspannung) sich überschneiden, tritt Versagen ein. Die zulässige Versagenswahrscheinlichkeit von Tragwerken ist im Allgemeinen auf Größenordnungen von 10^{-4} bis 10^{-7} festgelegt. Überprüft man die so konzipierten Stahltragwerke, so haben sie einen Sicherheitsfaktor in der Größenordnung von $S = 1,5$. Einen signifikanten Unterschied zwischen den Sicherheitsphilosophien gibt es – zumindest was das Ergebnis betrifft – nicht. Mit der probabilistischen Sicherheitsphilosophie lässt sich allerdings das wirkliche Belastungs-, Trag- und Versagensverhalten bei der Bewertung von bestehenden Tragwerken besser beschreiben und seine Anwendung führt häufig zu wirtschaftlichen Vorteilen.

Die Anwendung von probabilistischen Sicherheitskonzepten macht außerdem einen Vergleich der Sicherheitsniveaus unterschiedlicher Werkstoffe oder Tragwerke möglich.

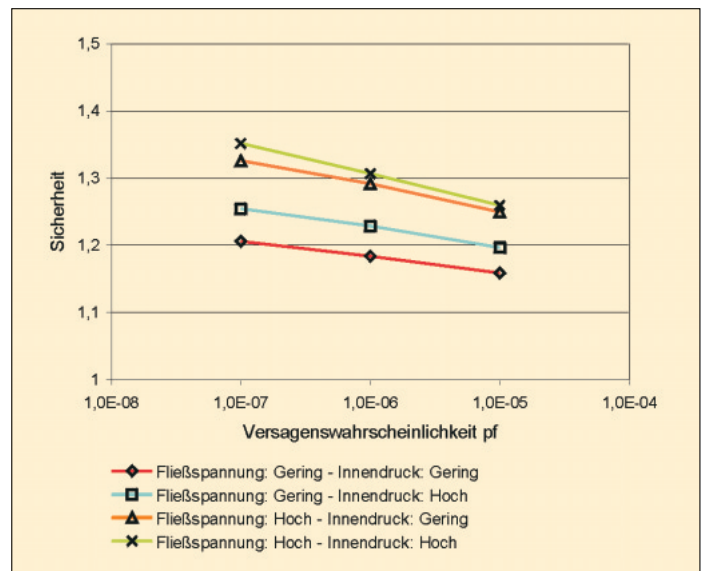
Die Sicherheit des Werkstoffes Stahl

Stahl kann als der Werkstoff gelten, der bezüglich Herstellung, Verarbeitung, Lieferung und Ausbildung von Verbindungselementen am besten erforscht ist und ein hohes und durchgängiges Sicherheitsniveau hat. Nicht nur der eigentliche Werkstoff ist durch Normen beschrieben, auch sämtliche Prüfverfahren sind standardisiert und die Normen betreffen sogar die Ausbildung des verarbeitenden Personals und deren Überprüfung. Der Erfolg zeigt sich darin, dass der eigentliche Werkstoff praktisch nie Grund für Fehler oder Schäden ist und die Sicherheiten mit $S = 1,5$ gegen Fließen äußerst gering sind, was umgekehrt zu einer hohen Wirtschaftlichkeit führt.

Der Zusammenhang zwischen Sicherheit und Versagenswahrscheinlichkeit beim Werkstoff Stahl ist in **Bild 3** aufgezeigt. Für Hochdruckrohre, die mit der Forderung, die Versagenswahrscheinlichkeit sei gleich 10^{-7} , designed wurden, ist dann mit Hilfe der Kesselformel nach DIN 2413 für die mit der Probabilistik ermittelte Wanddicke die vorhandene Sicherheit berechnet worden. Hier wird die oben bereits aufgestellte Behauptung belegt, dass $S = 1,5$ und $P_F = 10^{-7}$ korrespondierende Forderungen sind.

Bild 3: Verhältnis der Sicherheit zur Versagenswahrscheinlichkeit. Kurvenparameter: Streuung der Fließspannung und Streuung des Innendrucks

Fig. 3: Ratio of safety to probability of failure. Curve parameters: Yield stress scatter and internal pressure scatter



Wenn nun ein neuer Werkstoff, neue Verarbeitungsarten und neue Verbindungsmittel in ein bestehendes System integriert werden sollen, so müssen sie natürlich das gleiche Sicherheitsniveau aufzeigen, wie der bewährte bisherige Werkstoff. Ein unnötig höher liegendes Sicherheitsniveau für neue Werkstoffe ist zu vermeiden, da sonst die Wirtschaftlichkeit geringer wird. Es liegt also nahe, die oben beschriebenen Kunststoffrohre bezüglich Sicherheit, Belastungsversuchen und Qualitätsprüfung am Werkstoff Stahl auszurichten.

Sicherheit bei Kunststoffen

Kunststoffe unterscheiden sich vom Stahl wesentlich darin, dass ihr Tragverhalten abhängig ist von den Parametern

- Standzeit,
- Belastungsgeschichte,
- Temperatur,
- Medieneinfluss,
- äußere Einflüsse.

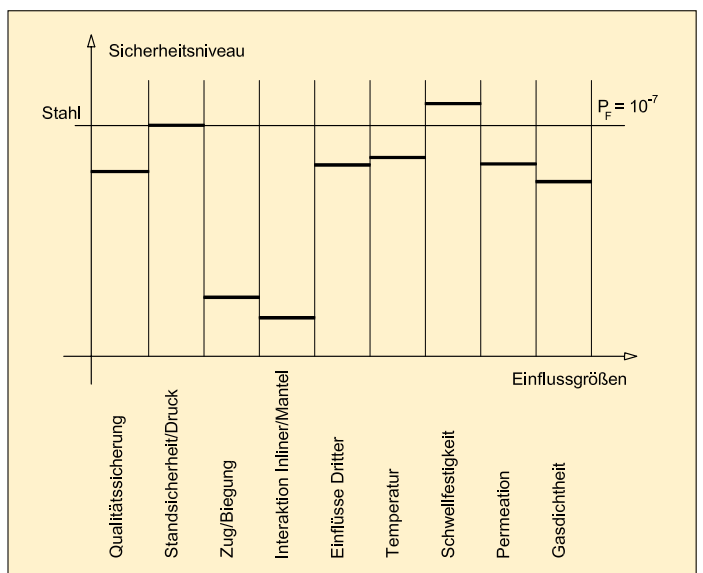
Selbstverständlich wird auch Stahl bei höheren Temperaturen oder Wechsel- und Schwellbelastung (Belastungsgeschichte) in seinem Tragverhalten beeinflusst, aber die entsprechenden Grenzwerte liegen weit außerhalb von Zuständen, die im Betrieb normaler Hochdruckleitungen erreicht werden.

Die Bemessung einer Kunststoffleitung kann nicht nur mit einem Sicherheitsfaktor geschehen, sondern die Sicherheitsfaktoren sind auf die unterschiedlichen Einflussgrößen zu beziehen:

$$F_{N,50} = F_K \cdot \frac{(a_1 \cdot a_2 \cdot \dots \cdot a_i)}{(S_1 \cdot S_2 \cdot \dots \cdot S_i)}$$

Bild 4: Qualitative Einschätzung des Sicherheitsniveaus einer Kunststoffhochdruckleitung im Verhältnis zu Stahl

Fig. 4: Qualitative estimation of the safety level of a high-pressure plastic pipe compared to steel



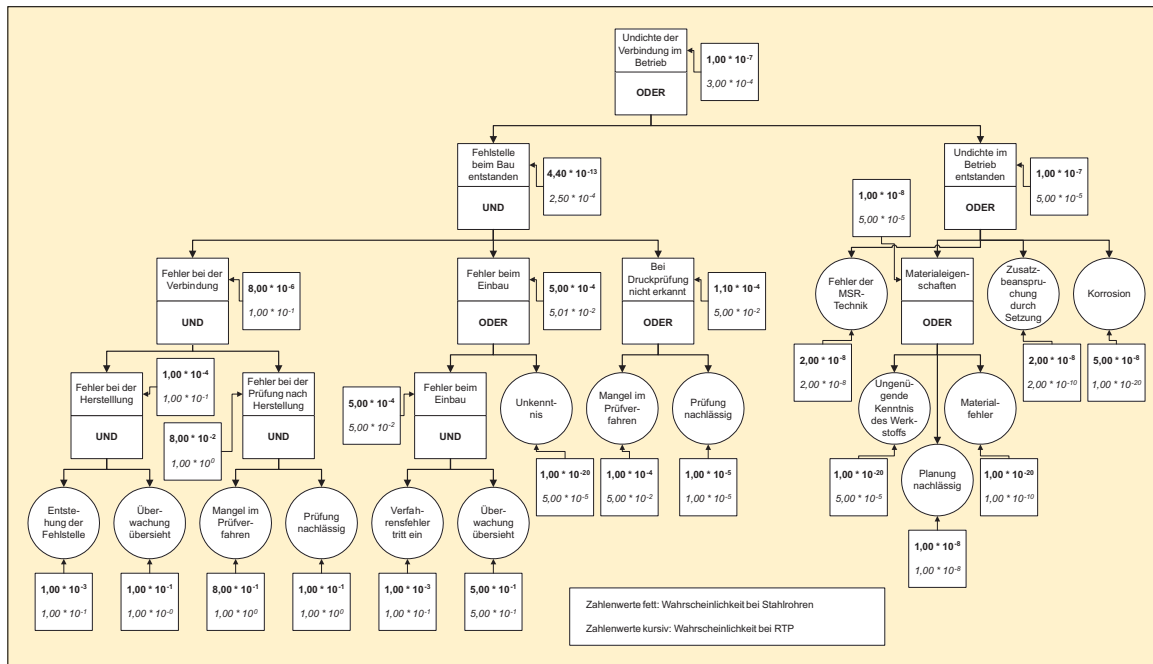


Bild 5: Beispiel für einen Fehlerbaum zur Fragestellung „Dichtheit der Verbindung“
Fig. 5: Example of a defect tracing diagram for investigation of joint tightness

- $F_{N,50}$: Tragfähigkeit des Werkstoffes nach fünfzig Jahren Standzeit
- F_K : Tragfähigkeit im Kurzzeitversuch
- a_i : Abminderungszahlen für die unterschiedlichen Einflüsse ($< 1,0$)
- S_i : Sicherheiten für die unterschiedlichen Einflüsse ($> 1,0$)

Selbst wenn die Gesamtsicherheit für den Kunststoff so festgelegt wird, dass das Sicherheitsniveau des Stahls vergleichsweise erreicht wird, lassen sich damit jedoch die Einzelsicherheiten nicht eindeutig festlegen und es wird deutlich, dass hier umfangreichere Untersuchungen und auch Versuche durchgeführt werden müssen.

Noch komplexer werden die Zusammenhänge bei der Untersuchung der Tragfähigkeit und Dichtheit der Verbindungsmittel. Hier gelten nicht nur abgesicherte Bemessungsformeln, sondern es müssen auch die Fehlermöglichkeiten durch Montagepersonal richtig bewertet werden.

Kunststoffleitungen sind damit schon bei erster Betrachtung sicherheitstechnisch anders zu bewerten, als Stahlleitungen, und es ist unmittelbar einsichtig, dass die Qualitätssicherung größerer Anstrengungen bedarf.

Die Aufteilung der Sicherheitsüberlegungen auf die jeweiligen Einflussgrößen ist in **Bild 4** aufgezeigt. Die Darstellung ist qualitativ und beruht noch nicht auf exakter Berechnung.

Fehlerbaumanalyse

Nach Kenntnis der in **Bild 4** aufgezeigten Verhältnisse ist es nun interessant, wirkliche Versagenswahrscheinlichkeiten

für die unterschiedlichen Einflussgrößen zu ermitteln, damit daraus Vorgaben für die Qualitätssicherung, für Sicherheitsnachweise bzw. für Versuchsprogramme abgeleitet werden können.

Dies geschieht mit Hilfe der Fehlerbaumanalyse. Für das Beispiel „Gasdichtheit“ ist ein solcher Fehlerbaum in **Bild 5** aufgezeigt. Selbstverständlich kommt diese Fehlerbaumanalyse nicht ohne Annahmen aus, aber seriöse Abschätzungen führen im Allgemeinen zu besseren Ergebnissen als das Arbeiten ohne jede nachvollziehbare Grundlage.

Im vorliegenden Fall sind die Einzelversagenswahrscheinlichkeiten für verschweißte Stahlrohre und für RTP-Rohre mit Schraubverbinder aufgezeigt. Bei Stahl führt die Frage der Gasdichtheit zu der erwarteten Größenordnung von $P_F = 10^{-7}$. Der Vergleichswert für bewehrte Kunststoffrohre ist deutlich höher und damit ungünstiger und das liegt in diesem Fall hauptsächlich an zwei Einflüssen: Zum einen ist die Fehlermöglichkeit bei der Montage sehr hoch und zum anderen ist über den wirksamen Kraftschluss an Kunststoffgewinden zu wenig bekannt.

Dieses Beispiel zeigt sehr deutlich, wie auf der Grundlage einer Fehlerbaumanalyse weiter verfahren werden kann. Zum einen müssen für die Montage genaue Anweisungen zur Handhabung der Spezialwerkzeuge und dem Aufbringen der erforderlichen Drehmomente erstellt werden, und es müssen Überwachungsmethoden entwickelt werden, die dem Prüfen der Schweißnähte bei Stahlrohren gleichwertig sind.

Festlegung von Versuchen

Bei der Frage der Tragfähigkeit von Kunststoffrohrsystemen führen Versuche zu belastbaren Aussagen, die theoretische Untersuchungen absichern. Hier stellt sich die Frage, wie viel Versuche mit jeweils unterschiedlichen Rohrparametern (Durchmesser, Druckstufe usw.) durchgeführt werden müssen.

Eine eindeutige Aussage ergibt sich hier, wenn die Anzahl der Versuche so groß ist, dass Streuung und weitere Parameter der Versagenswahrscheinlichkeitstheorie den jeweils wirklichen Werten angenähert sind.

Es darf für einen seriösen Sicherheitsnachweis damit nicht bei der üblichen Stichprobe von wenigen Versuchen bleiben, sondern die Versuchsanzahl muss so berechnet werden, dass das Vertrauensniveau für die Versuchsaussage erreicht wird.

Zusammenfassung

Die Ausführungen zeigen auf, dass bei neuen Werkstoffen und Tragwerken, die auf den ersten Blick die gleichen Haupteigenschaften haben, wie bekannte und bewährte Systeme, in den Fragen der Sicherheiten und Qualitätssicherungen erhebliche Defizite existieren können.

Mit Hilfe der Versagenswahrscheinlichkeit können sowohl die jeweiligen Sicherheitsstufen aufgezeigt und verglichen werden, als auch Maßnahmen zur Verbesserung dieser Sicherheitsniveaus festgelegt werden.

Liegen alle sicherheitstechnischen Untersuchungen vor, können bei Spezialanwendungen diese RTP eine wirtschaftliche Alternative zu Stahlleitungen darstellen.