

# Stahlrohre für Kraftwerksanwendungen

## Werkstoffanforderungen und Auslegungspraxis

Von Hans-Jürgen Kocks<sup>1</sup>, Steffen Zimmermann<sup>2</sup>, Susanne Höhler<sup>2</sup>, Michael Spiegel<sup>2</sup>

### 1 Einleitung

Die Sicherheit von Rohrleitungen wird in hohem Maße durch das Festigkeits- und Verformungsvermögen der eingesetzten Rohrwerkstoffe bestimmt. Dies trifft auf alle Anwendungsbereiche von der Konstruktion über die Gas- und Wasserversorgung (< 20 °C), dem Transport von Fernwärme (100 ÷ 140 °C) bis hinzu den Kraftwerksleitungen (> 200 °C) zu. Während beispielsweise im Bereich der Gastransportleitungen ausschließlich Stahl als Werkstoff zur Anwendung kommt, ist im Bereich der Verteilungsleitungen auch Kunststoff als Konstruktionswerkstoff eine Alternative. Die (Aus-)Wahl des geeigneten Konstruktionswerkstoffs wird durch eine Reihe von Faktoren bestimmt. Die Entscheidung, welchem Werkstoff der Vorzug gegeben wird, wird meist nicht nur vor dem Hintergrund technologischer Gesichtspunkte entschieden, sondern vor allem auch auf der Grundlage ökonomischer Aspekte [1].

Bei der Auslegung von Leitungsrohren sind in Bezug auf die Langzeiteigenschaften zwei grundlegende Konzeptionen zu unterscheiden. So werden Stahlleitungen sowohl unter der Maßgabe unveränderlicher mechanischer Eigenschaften für den erdverlegten Rohrleitungsbau, aber auch mit Blick auf kontinuierlich sich ändernde mechanische Eigenschaften während des Betriebes speziell im Hochtemperaturbereich von Kraftwerksleitungen ausgelegt. In diesem Falle sind Phänomene wie die Alterung und deren Temperatur- und Zeitabhängigkeit zu berücksichtigen. Im Rahmen des vorliegenden Beitrags werden einige ausgewählte Fragen zur Auslegung von Rohrleitungen für Kraftwerksleitungen erörtert.

### 2 Temperatur- und zeitabhängiges Verhalten von Rohren

Ein wesentlicher Aspekt bei der Auswahl von Rohrwerkstoffen, die im Anwendungsbereich einem temperatur- und zeitabhängigen Materialverhalten unterliegen, ist das Zeitstandverhalten und damit in der Regel die Zeitstandfestigkeit. Die Zeitstandfestigkeit ist dabei die ruhende Belastung, die bei einer bestimmten Temperatur nach einer festen Zeit zum Bruch eines Bauteils führt. Dabei sinkt die Zeitstandfestigkeit bei steigenden Temperaturen. Wenn Rohre aufgrund ihres Transportmediums oder der Umgebungstemperaturen einer erhöhten thermischen Beanspruchung ausgesetzt sind, müssen Zeitstandeigenschaften nachgewiesen werden.

Obwohl vom Standpunkt der Physik die Alterung grundsätzlich eine Funktion von Temperatur und Zeit ist, kann bei Stählen bei tieferen Temperaturen praktisch keine Alterung nachgewie-

<sup>1</sup> Dr.rer.nat. Hans-Jürgen Kocks, Mannesmann Fuchs Rohr GmbH, Siegen

<sup>2</sup> Dr.-Ing. Steffen Zimmermann, Dr.-Ing. Susanne Höhler, Dr.rer.nat. Michael Spiegel, Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH, Duisburg

sen werden. Als Faustformel gilt, dass Zeitstandverhalten nur dann zu erwarten ist, wenn das Stahlbauteil einer Betriebstemperatur ausgesetzt ist, die das 0,4-fache des absoluten Schmelzpunktes überschreitet.

Ursache für das Zeitstandverhalten ist das geänderte Verformungsverhalten eines Werkstoffes bei erhöhten Temperaturen. Beim Stahlrohr ist neben der Verfestigung durch Verformung eine diffusionsabhängige Abnahme der Festigkeit zu berücksichtigen. Durch die zeitabhängige Abnahme der Festigkeit ergibt sich eine plastische Dehnung, die bei konstanter Spannung als „Kriechen“ bezeichnet wird. Die Temperaturen, bei denen ein ausgeprägtes Kriechverhalten auftritt, liegen abhängig vom jeweils betrachteten Werkstoff meist oberhalb von 400 °C. Der Werkstoff befindet sich dann im sog. Zeitstandbereich, welcher den Bereich der Warmstreckgrenze ablöst, siehe Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..

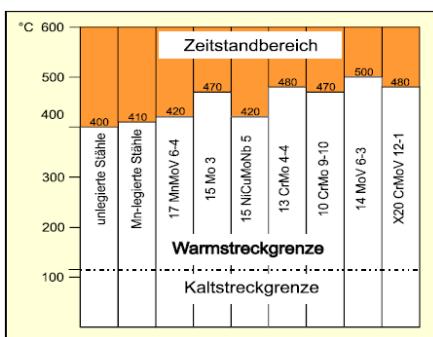


Bild 1: Warmstreckgrenze und Beginn des Zeitstandbereichs für einige warmfeste Stähle [2]

Solche Einsatztemperaturen, sind in der Kraftwerkstechnik üblich. Dort werden warmfeste Stähle eingesetzt, die sich grob in drei Gruppen unterteilen lassen:

1. Die unlegierten warmfesten Kohlenstoffstähle sind aufgrund geringer Phosphor- und Schwefelgehalte bis zu ca. 350 – 400 °C temperaturbeständig. Sie sind in der Regel normalisiert und manganlegt.
2. Die warmfesten Stähle für den Anwendungsbereich bis ca. 610 °C sind hauptsächlich mit Chrom und Molybdän legiert sowie geringen Zusätzen an Nickel und Karbidbildnern (V, Nb, W) und werden bei hohen Anlasstemperaturen vergütet. Zu dieser Gruppe gehören die heute im Kraftwerksbereich eingesetzten ferritisch-martensitischen Stähle mit 9-12 % Chrom.
3. Bei den hochwarmfesten Stählen handelt es sich um austenitische Stähle, die bis zu Temperaturen von ca. 650 °C beständig sind. Aufgrund ihres austenitischen Gefüges besitzen die Stähle einen hohen Verformungswiderstand auch bei hoher Temperatureinwirkung. Bei noch höheren Temperaturen müssen dann Nickelbasiswerkstoffe eingesetzt werden.

Das Kriechverhalten eines metallischen Werkstoffs kann in einem Zeitstandversuch, nach DIN EN 10291 [3] ermittelt werden. Eine Probe wird bei einer festgelegten Temperatur mit einer konstanten mechanischen Spannung belastet. Die Temperatur wird konstant gehalten und die Dehnung wird zeitabhängig registriert. Der Zeitstandversuch kann bei konstanter Zugbeanspruchung im Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und 1100 °C durchgeführt werden. Die Versuchsergebnisse sind die Zeiten  $t_e$  und  $t_{Bruch}$ , für die sich bei einer angelegten Spannung  $\sigma$  und bei vorgegebener Temperatur  $T$  eine vorgegebene plastische Grenzdehnung  $\varepsilon_p$  oder Materialversagen (= Bruch) einstellt. Die zugehörigen Spannungen heißen Zeitdehnungsgrenze und Zeitstandfestigkeit. Wird als Grenzdehnung  $\varepsilon_p$  z.B. eine bleibende Verformung von 0,2 % festgelegt, dann wird die Zeitdehnungsgrenze mit  $R_{p0,2/T}$  bezeichnet. Die Zeitstandfestigkeit  $R_{m/T}$  ist die Prüfspannung, die bei der Prüftemperatur  $T$  nach der Dauer  $t$  zum Bruch der Probe führt. Die Auswertung einer Serie von Zeitstandversuchen an einem Werkstoff geschieht graphisch anhand von Zeitdehn- oder von Zeitstanddiagrammen, deren Achsen doppellogarithmisch eingeteilt sind. Mittels dieser Diagramme kann in Abhängigkeit der Beanspruchungsdauer die zulässige Beanspruchung abgelesen werden. Bild 2 zeigt ein Zeitstanddiagramm mit Zeitstandkurven für einen Chrom-Nickel-Stahl für verschiedene Prüftemperaturen.

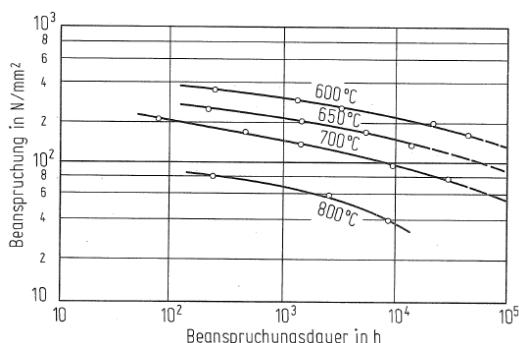


Bild 2: Zeitstandkurven eines hochwarmfesten Chrom-Nickel-Stahls bei verschiedenen Versuchstemperaturen [4]

### 3 Einsatz von Rohren bei Raumtemperatur

Erdverlegte Rohrleitungen für den Gas- oder Wassertransport sind typische Beispiele, deren Bemessung üblicherweise auf einen Temperaturbereich unterhalb der Raumtemperatur beschränkt werden kann. Im Fall von Stahlrohren liegt unter diesen Bedingungen keine Zeitstandbeanspruchung vor, weshalb konventionelle Stahlgüten eingesetzt werden. Die Auslegung erfolgt aufgrund der Festigkeitsparameter, d.h. der Streckgrenze  $R_e$  bzw. der 0,2%-Dehngrenze  $R_{p0,2}$  und der Zugfestigkeit  $R_m$ . Die Kennwerte werden im einachsigen Zugversuch bei Raumtemperatur ermittelt. Die Auslegung kann beispielsweise bei Gasleitungen gemäß DIN EN 1594 [5] erfolgen. Stahlrohre für die Erdverlegung müssen, speziell im Falle einer Ausnutzung der zulässigen Innendruckbeanspruchung, auch bezüglich weiterer Lasten wie Erdlasten, Verkehrslasten usw. bemessen. Die sich überlagernden Spannungen aus Innen-

druck und zusätzlicher Lasten können dabei z.B. auch nach VdTÜV-Merkblatt 1063 [6] berechnet werden. Für Gastransportleitungen kommt aufgrund der unter betrieblichen Aspekten erforderlichen permanenten Überwachung nur Stahl in Frage. Gleiches gilt für Anwendungen mit hohem äußerem Überdruck, wie dies z.B. bei Offshore-Leitungen der Fall ist. Aufgrund der geforderten hohen Kollapsdrücke können die Leitungen nur in Stahl ausgeführt werden. Bei Offshore-Anwendungen muss i. d. R. das Zeitstandverhalten nicht berücksichtigt werden.

#### 4 Einsatz von Rohren bei erhöhten Temperaturen

Bei Betriebstemperaturen oberhalb von etwa 400 °C, ist auch bei Rohrkomponenten aus Stahl das Zeitstandverhalten zu berücksichtigen. Das Hauptanwendungsgebiet in diesem Fall ist der Kraftwerksbau. Dort werden Dampf führende Komponenten, wie Kessel, Kraftwerksohrleitungen und Armaturen, über einen sehr langen Zeitraum sowohl mechanisch (infolge des Dampfdrucks im Inneren der Bauteile) als auch thermisch beansprucht. Die heute üblichen Auslegungszeiten der Anlagen von 10 bis 25 Jahren bei erhöhten Betriebstemperaturen und – drücken stellen erhebliche Anforderungen an die Zeitstandeigenschaften der Komponenten dar, die auslegungstechnisch nach 100.000 h noch 100 MPa betragen muss. Ein optimiertes Zeitstandverhalten der Bauteile bildet somit die Basis für eine weitere Steigerung der Dampfparameter und damit für eine Verbesserung der Wirkungsgrade der Kraftwerke. Daneben lassen höhere Zeitstandfestigkeiten zu, dass die Wanddicken der Stahlrohre reduziert werden können. Auch aus diesem Grund sind bei hohen Zeitstandbeanspruchungen Rohre aus konventionellen Stählen teilweise nicht einsetzbar, weil die resultierenden großen Wanddicken für den Anlagenbau nicht praktikabel sind.

Im konventionellen Kraftwerksbau wurden zunächst legierte warmfeste Stähle eingesetzt. Umfangreiche Langzeitversuche wurden in den letzten vier Jahrzehnten durchgeführt, die auch die Zeitstanduntersuchungen an Bauteilen einschlossen, die schon längere Zeit in Kraftwerksanlagen im Betrieb gewesen waren [7,8]. Nach Ablauf der Auslegungszeit stellte sich die Frage der weiteren Verwendbarkeit der Rohrkomponenten. Mit Versuchsserien aus dem Grundwerkstoff und den Schweißnahtbereichen wurden gute Langzeitwerte bis zu Temperaturen von 550 °C erzielt. Bauteile aus dem typischen warmfesten Stahl 13 CrMo 4-4, die vorher in der Anlage eingesetzt waren, erreichten zum Beispiel eine Zeitstandfestigkeit von 45 MPa bei 550 °C nach 100.000 Stunden.

Generell sind bei der Auslegung die Grenzen der Zeitstandfestigkeit bei Stählen mit einem Chromgehalt von 1% bei etwa 550 °C erreicht. Im Vergleich dazu erreichen Entwicklungen aus der Gruppe der ferritisch-martensitischen 9-12 % Chromstähle wie P91 und P92 mit den geforderten 100.000 h Zeitstandfestigkeiten von 100 MPa bei Temperaturen von 570 bzw. 610 °C.

Für die hochlegierten austenitischen Stähle wurde demgegenüber ein noch drastisch verbessertes Zeitstandverhalten erprobt /8/. Diese Stähle lassen auch bei Temperaturen von 650 °C sehr gute Langzeitwerte zu. Damit im Kraftwerksbau künftig die Dampfparameter auf 700 °C und darüber hinaus gesteigert werden können, bei gleichzeitig sehr hoher Innendruckbean-

spruchung der Bauteile, beschäftigen sich die Entwicklungen derzeit mit Nickelbasis-Werkstoffen, wie etwa Alloy 617.

## 5 Zusammenfassende Bewertung

Bei der Errichtung von Stahlrohrleitungen spielen Sicherheitsaspekte eine große Rolle. Im Zuge der europäischen Harmonisierung der Normen sind dazu Sicherheitskonzepte basierend auf Grenzzuständen (Limit States) entwickelt worden. Für Stahl als Konstruktionswerkstoff haben sich Sicherheitskonzepte etabliert, durch die Sicherheitslücken effizient minimiert werden können. Drei wesentliche Eckpunkte des Normensystems führen zu dem geschlossenen Sicherheitssystem:

- Durch Standardisierung der Produkte in den Liefernormen sind Material- und Produkteigenschaften vorgegeben.
- Die Konstruktion, hier: die Rohrleitung, wird aus Standardprodukten gefertigt. Die Errichtung unterliegt Ausführungsstandards für die Qualitätssicherung, welche die Verarbeitung (z.B. die Herstellung von Schweißverbindungen), die Qualifikation des verarbeitenden Personals (z.B. Schweißerprüfungen) sowie Inspektionen (z.B. die 100%ige zerstörungsfreie Prüfung auf Bauteil- oder Schweißnahtdefekte) einschließt.
- Die Bemessungsnormen, z.B. zur Berechnung der Rohrtragfähigkeit, nehmen Bezug auf die Liefer- und die Ausführungsnormen. Darüber hinaus beruhen sie auf der statistischen Auswertung umfangreicher Versuchsserien, deren Bauteilproben wiederum aus standardisierten Produkten mit der Qualität gemäß den Ausführungsstandards gefertigt wurden.

Das lückenlose Sicherheitssystem ist für zeitstandbeanspruchte Bauteile nicht mehr komplett zutreffend. Hier besitzt auch der „Stress Test“, die Druckprüfung, die an Leitungsrohren oder ganzen Rohrsträngen als Dichtigkeits- und Tragfähigkeitsnachweis durchgeführt wird, bei zeitstandbeanspruchten Rohren keine genügende Aussagekraft. Das Langzeitverhalten kann mit diesem Sicherheitsnachweis nicht ausreichend geklärt und beurteilt werden. Die Auslegung erfolgt dann über Bemessungswerte für das Langzeitverhalten, die nicht am Bauteil bzw. der Konstruktion verifiziert wurden, sondern auf Tragfähigkeitswerten, die aufgrund von Extrapolationsverfahren aus Kurzzeitversuchen abgeschätzt wurden. Den Prüfungen in der Fertigung kommt dann besondere Bedeutung zu, um die Übertragbarkeit der in der Bemessung getroffenen Annahmen auf die spezifische Anwendung sicherzustellen. Bislang sind nur nahtlose Rohre im Kraftwerksbau zugelassen, die nach DIN EN 10216-2 [9] im Fall von legierten Stählen einer 100%igen zerstörungsfreien Prüfung im Anschluss an den Rohrproduktionsprozess unterzogen werden müssen. Die Anwendung von Stahlrohren im Anlagen- bzw. Kraftwerksbau ist auf frei verlegte Leitungen beschränkt. Hier konzentriert sich der Lastfall auf die reine Innendruckbeanspruchung der Rohrleitung, die in den Untersuchungen zum Zeitstandverhalten auch abgebildet wird. Diese Anlagen werden durch vielfältige Kontrollmechanismen permanent überwacht.

### Literaturhinweise

- [1] Reuter, M.: Methodik der Werkstoffauswahl, Hauser-Verlag, 2007
- [2] Tolksdorf, E.: Hochleistungswerkstoffe im Kraftwerksbau, Vorlesung Beanspruchungsgerechte Werkstoffwahl und –behandlung, TU München, 1999
- [3] DIN EN 10291: Metallische Werkstoffe - Einachsiger Zeitstandversuch unter Zugbeanspruchung - Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 10291:2000
- [4] VDEH: Werkstoffkunde Stahl, Band 1: Grundlagen, Springer Verlag 1984
- [5] DIN EN 1594:2000-09: Rohrleitungen für einen maximal zulässigen Betriebsdruck von über 16 bar, Funktionale Anforderungen, Beuth Verlag 2000
- [6] VdTÜV-Merkblatt 1063: Technische Richtlinie zur statischen Berechnung eingeerdeter Stahlrohre (Mai 1978)
- [7] Kalwa, G., Weber, H.: Lebensdauerberechnung betrieblich zeitstandbeanspruchter Komponenten, 3R international, 27 (1988), 410-415
- [8] Bendick, W.: Zeitstandfestigkeit betriebsbeanspruchter Bauteile, Mannesmann Forschungsinstitut, MFI-Bericht 93, 2002
- [9] DIN EN 10216-1:2004-07: Nahtlose Stahlrohre für Druckbeanspruchungen- Technische Lieferbedingungen - Teil 2: Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen