



1 Einleitung und Zielsetzung

Energieknappheit und Ressourcenschonung sind zwei Schlagworte, die heute in aller Munde sind. Durch die steigende Weltbevölkerung sowie durch die fortschreitende Industrialisierung der Schwellenländer wird, bezogen auf 2010, ein Wachstum des Energiebedarfes bis 2035 um ein Drittel erwartet [IEA11]. Nationale politische Entscheidungen, wie auf nukleare Energiegewinnung zu verzichten, verschärft diese Entwicklung zusätzlich. Um die Energieressourcen zu schonen, ist es deshalb unverzichtbar, die Effizienz der Kraftwerke zu erhöhen und bestehende Kraftwerke zu modernisieren.

Je nach Kraftwerksart kann der Wirkungsgrad gesteigert werden. Der Carnot-Prozess limitiert bei thermischen Kraftwerken, die eine Dampfturbine zur Energiegewinnung einsetzen, den maximal erreichbaren Wirkungsgrad. Die Effizienz der Dampfturbine berechnet sich entsprechend durch die Temperaturdifferenz des Frischdampfes vor bzw. nach der Dampfturbine. Das Ziel ist es, die Eingangstemperatur möglichst zu erhöhen. Daneben sorgt eine Anhebung des Druckes ebenfalls zu gesteigerten Wirkungsgraden. Mit Erhöhung der Betriebsparameter des Frischdampfes werden aber auch höhere Anforderungen an die Werkstoffe der Rohrleitungen gestellt. Die Rohrwerkstoffe der modernsten Kraftwerke basieren auf martensitischen Stählen mit bis zu 12% Chrom. Die Einsatztemperatur ist jedoch auf maximal 630 °C beschränkt, da bei höheren Temperaturen der Stahl während der Betriebszeit von mehreren Zehntausend- bis einigen Hunderttausend-Stunden nicht kriechbeständig ist (siehe Kapitel 2.1.2).

Aktuelle Forschungen beschränken sich auf den Ersatz der derzeit verwendeten Stahlsorten durch hochlegierte Nickelbasislegierungen. Diese benötigen jedoch teure, da selten vorkommende, Legierungselemente (siehe Kapitel 2.1.2). Das Alternativkonzept des BMBF-Projektes „Compoundrohre – Ressourceneffiziente faserrummantelte Stahlrohre für Höchsttemperaturdampfpanwendungen“ (2009 – 2012) und der darin verankerten vorliegenden Arbeit sieht die Entwicklung eines Metall-Keramik-Hybridrohres vor.

1.1 Konzept des Metall-Keramik-Hybridrohres

Das Designkonzept des Metall-Keramik-Hybridrohres nach [Mai07] basiert auf dem Prinzip der Funktionentrennung. Hierbei übernehmen das innen liegende Stahlrohr bzw. die außen aufgebrachte Armierung aus faserverstärkter Keramik unterschiedliche Aufgaben bei einer Beanspruchung des Verbundbauteils. Dadurch kann der Verbund von den jeweiligen Vorteilen der verschiedenen Werkstoffe profitieren und diese gezielt kombinieren.

Im Metall-Keramik-Hybridrohr sorgt das innen liegende Stahlrohr durch seine Mikrostruktur weiterhin für die Gasdichtheit. Auch die Korrosionsbeständigkeit des Stahlrohrs gegenüber dem geführten Frischdampf wird bei diesem Konzept ausgenutzt. Da jedoch durch die geplante Frischdampf Temperatur die Dauerfestigkeit des Stahls nicht mehr hinreichend ist,



übernimmt die Armierung aus faserverstärkter Keramik (Ceramic Matrix Composite, CMC) einen Teil der mechanischen und thermischen Belastung des Hybridrohrs.

Das Metall-Keramik-Hybridrohr nutzt somit weiterhin die Erfahrung mit Stahlrohrleitungen im Kraftwerksbereich und ermöglicht eine Verlängerung der Lebensdauer durch eine spätere Armierung mit einem CMC-Werkstoff. Die aktuell verwendeten Stähle und deren Anwendungsbereiche innerhalb der Kraftwerkstechnik werden in Kapitel 2.1.2 erläutert.

Die Armierung mit CMC-Werkstoffen von Stahlrohren und die damit verbundene Übernahme von thermo-mechanischer Last wird durch die Faserverstärkung der Keramik ermöglicht. Der radialen Ausdehnung des Stahlrohres wirkt die geringere thermische Ausdehnung der CMC-Armierung entgegen, so dass sich im Stahlrohr Druckspannungen und in der CMC-Armierung Zugspannungen ausbilden. Durch das Aufbauen von Druckspannungen im Stahlrohr wird das tertiäre Kriechen, welches zum katastrophalen Versagen des Stahlrohres führen würde, vermieden bzw. hinausgezögert. Entgegen der monolithischen Keramik ist die faserverstärkte Keramik durch die Mechanismen „Rissumlenkung“, „Einzelfaserbruch“ und „Faser-Pull-Out“ quasi-duktil und kann zu einem gewissen Anteil auf Zug belastet werden (siehe Kapitel 2.3.1). Wie für Keramiken üblich sind CMC-Werkstoffe zudem sehr temperaturbeständig, so dass die Verstärkung des Stahlrohres auch bei den Anwendungstemperaturen sichergestellt ist.

Neben dem von Maile et. al. patentierten Druckgefäß [Mai07] kann das Konzept mit einer zusätzlichen Schicht zwischen Stahlrohr und CMC-Armierung versehen werden (Abb. 1.1). Diese kann zur Reduzierung der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Stahl und CMC und der damit verbundenen auftretenden Zugspannungen innerhalb der CMC-Armierung notwendig sein. Die vorliegende Arbeit verzichtet jedoch auf eine dritte Schicht und betrachtet die Anwendung des Konzeptes nur durch Variation der CMC-Armierung.

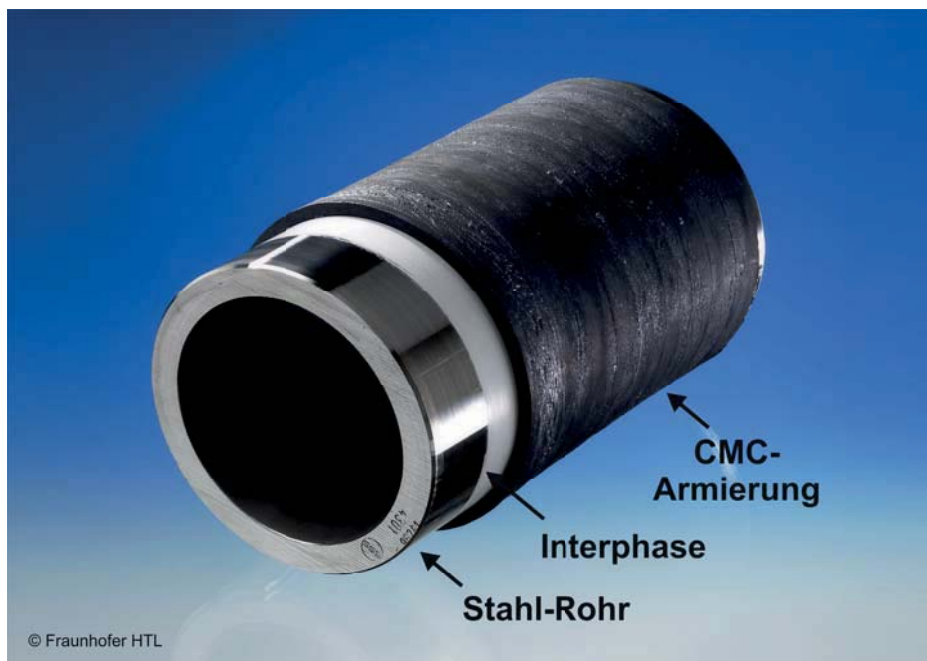


Abb. 1.1: Konzept des Metall-Keramik-Hybridrohres



1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es eine faserverstärkte Keramik zur Armierung eines Stahlrohres zu entwickeln. Das Metall-Keramik-Hybridrohr soll entsprechend des Konzeptes aus Kapitel 1.1 eine erhöhte Lebensdauer bei thermo-mechanischer Beanspruchung aufweisen. Zur Erfüllung des Aufgabenziels wurde zu Beginn ein Lastenheft (Tabelle 1.1) aufgestellt.

Um auch bestehende Rohrleitungen nachträglich armieren zu können, ist die maximale Herstellungstemperatur der Metall -Keramik-Hybridrohre auf 700 °C beschränkt, um mikrostrukturelle Schädigungen des Stahls zu vermeiden. Daneben soll aber auch eine Armierung durch faserverstärkte Keramik vor dem Einbau der Rohrleitungen in ein Kraftwerk möglich sein. Da die spätere Anwendung bei 700 °C an Luft erfolgt, muss der CMC-Werkstoff in diesem Temperaturbereich oxidations- und kriechbeständig sein.

An die Einzelkomponenten des CMC-Werkstoffs – die Faserverstärkung sowie die keramische Matrix – werden weitere Anforderungen gestellt. Die verwendete Faser muss als Roving, also Endlosfaserbündel, und Gewebe kommerziell in ausreichenden Mengen verfügbar sein. Die dafür aufzuwendenden Kosten spielen zunächst in der Entwicklung keine ausschlaggebende Rolle, müssen aber für eine spätere Kommerzialisierung im Auge behalten werden. Wie der CMC-Werkstoff für sich, muss natürlich auch die Faser oxidationsbeständig sein. Um das Stahlrohr langfristig stabilisieren und entlasten zu können, muss speziell die Faser kriechbeständig im Bereich der Einsatztemperatur sein sowie eine hohe Zugfestigkeit aufweisen.

Die Auswahl der keramischen Matrix wird maßgeblich über die beschränkte Herstellungstemperatur auf maximal 700 °C bestimmt. Um eine nachträgliche Armierung zu ermöglichen, ist eine Verarbeitung an Luft notwendig. Zudem muss die Matrixvorstufe bei Raumtemperatur flüssig oder lösbar sein. Im Zuge des Gesundheitsschutzes sollte auf hochgiftige Komponenten oder Lösungsmittel verzichtet werden. Eine Keramisierung an Luft ist wünschenswert, da dadurch auf eine aufwändige, hochtemperaturbeständige Abdichtung bei der Armierung von bestehenden Rohrleitungen verzichtet werden kann. Wie bereits die Fasern muss die Matrix bei 700 °C ebenfalls oxidationsbeständig sein. Die Faser darf durch die Matrixzusammensetzung nicht angegriffen oder beeinträchtigt werden. Eine mehrmalige Infiltration der Faserpreform mit der Matrixvorstufe ist bei einer nachträglichen Armierung von Stahlrohren schwer umsetzbar und zudem zeit- und kostenaufwändig. Daher soll die CMC-Armierung durch eine einmalige Infiltration der Faserbündel hergestellt werden.

1.3 Vorgehensweise

Die Entwicklung einer faserverstärkten Armierung zur Anwendung in einem Metall-Keramik-Hybridrohr wird in dieser Arbeit sowohl theoretisch als auch experimentell untersucht. Die Theorie basiert auf dem ermittelten Stand der Technik der Kraftwerkstechnologie, der CMC-Werkstoffe sowie der bereits bekannten Metall-Keramik-Hybridlösungen (Kapitel 2). Anschließend wird ein Simulationsmodell mittels Finite-Element-Analyse aufgestellt und diverse Parameter, beispielsweise das Geometrieverhältnis zwischen der Wandstärke des Stahlrohres und der CMC-Armierung, auf ihren Einfluss auf die Spannungsverteilung im Hybridrohr untersucht (Kapitel 4.1).



Tab. 1.1: Lastenheft zur Entwicklung einer CMC-Armierung für ein Metall-Keramik-Hybridrohr

Pos.	Art	Beschreibung
1		Metall-Keramik-Hybridrohr
1.1	Pflicht	Verlängerung der Lebensdauer von Stahlrohren bei 700 °C und 30 MPa Innendruck
1.2	Wunsch	Armierung von bestehenden, eingebauten Rohrleitungen
2		CMC-Werkstoff
2.1	Pflicht	Zugfestigkeit zur Aufnahme von Zugspannungen
2.2	Pflicht	Oxidationsbeständig bei 700 °C
2.3	Pflicht	Kriechbeständig bei 700 °C
2.4	Pflicht	Armierung eines Stahlrohres
3		Faserverstärkung
3.1	Pflicht	Kompatibel mit keramischer Matrix zur Herstellung eines CMC-Werkstoffes
3.2	Pflicht	Verfügbarkeit als Roving und Gewebe in ausreichenden Mengen
3.3	Wunsch	Kostengünstig
3.4	Pflicht	Oxidationsbeständig bei 700 °C
3.5	Pflicht	Kriechbeständig bei 700 °C
3.6	Pflicht	Hohe Zugfestigkeit
4		keramische Matrix
4.1	Pflicht	Maximale Herstellungstemperatur ≤ 700 °C
4.2	Pflicht	Verarbeitbar an Luft
4.3	Pflicht	Vorstufe bei Raumtemperatur flüssig oder lösbar
4.4	Wunsch	Verzicht auf Lösungsmittel und hochgiftige Komponenten
4.5	Pflicht	Infiltrierbarkeit der Faserrovings
4.6	Wunsch	Keramisierung an Luft
4.7	Pflicht	Oxidationsbeständig bei 700 °C
4.8	Pflicht	Kein Angriff der Faser
4.9	Wunsch	Keine Reinfiltration der Preform

Der experimentelle Teil untergliedert sich zunächst in die reine Betrachtung und Untersuchung der Einzelkomponenten Faser und Matrix (Kapitel 4.2 bzw. 4.3). Diese werden hinsichtlich des in Kapitel 1.2 aufgestellten Lastenheftes bewertet. Der daraus resultierende CMC-Werkstoff wird charakterisiert (Kapitel 4.4) und auf unterschiedliche Herstellungsparameter (Ausgangsstoffe, die Atmosphäre während der Pyrolyse, Verstärkungsart) untersucht. Anschließend werden Prototypen auf ihre Eignung im Metall-Keramik-Hybridrohr hinsichtlich der Verlängerung der Lebensdauer geprüft (Kapitel 4.5).

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich dabei auf die Armierung von geraden Stahlrohren mit konstanten Durchmesser. Gekrümmte, sich verzweigende oder verjüngende Stahlrohre sind nicht Fokus dieser Arbeit, jedoch für den späteren Einsatz zu überprüfen. Ebenso wenig wird die in Kapitel 1.1 erwähnte Zwischenschicht weiter betrachtet oder entwickelt.



2 Stand der Technik

Im ersten Kapitel der Literaturübersicht zum Stand der Technik wird die Kraftwerkstechnik und die hierfür verwendeten Stahl-Werkstoffe vorgestellt. Das Gebiet der Metall-Keramik-Verbunde wird im nachfolgenden Kapitel erläutert. Die zu entwickelnde Armierung besteht aus einer keramischen Matrix, wozu in der Literaturübersicht die CMC-Werkstoffe sowie auf natürlich vorkommenden Oxiden basierende Matrix-Werkstoffe behandelt werden. Abschließend wird die Finite Element Analyse vorgestellt.

2.1 Kraftwerkstechnik

2.1.1 Fossilbefeuerte Kraftwerke

Die wachsende Weltbevölkerung sowie der damit verbundene Anstieg des weltweiten Strombedarfs erfordern stetige Verbesserungen in der fossilen Kraftwerkstechnik. Zwischen 2010 und 2030 müssen veraltete, deutsche Kraftwerke mit einer Kapazität von ca. 40.000 MW ersetzt werden [Sch04]. Zusätzlich fehlen durch den 2011 von der Bundesregierung beschlossenen Atomausstieg ab 2020 ca. 21.000 MW Energiekapazität [BRD12; RWE11]. Es ist deshalb notwendig, die Effizienz der fossilbefeuerten Kraftwerke zu steigern. Ein höherer Wirkungsgrad bedeutet gleichzeitig, dass die fossilen Ressourcen geschont werden, da aus jeder eingesetzten Tonne Brennstoff mehr Energie gewonnen werden kann.

Die Steigerung des Wirkungsgrades von fossilbefeuerten Kraftwerken erfolgt über die Erhöhung der Frischdampf Temperatur sowie des -druckes zwischen dem Überhitzer und der Turbine (Abb. 2.1) [Grü99; Met08]. Der heutige Stand der Technik sind Kraftwerke mit überkritischem Frischdampf, d. h. die Temperatur liegt bei bis zu 620 °C und der Druck bei 27 MPa. Je nach Kohlensorte werden somit Wirkungsgrade zwischen 43 und 45 Prozent erreicht. Der Durchschnitt aller Kraftwerke in der Europäischen Union liegt aktuell bei 37 – 38 Prozent, weltweit bei unter 30 Prozent (Abb. 2.2) [Mat10].

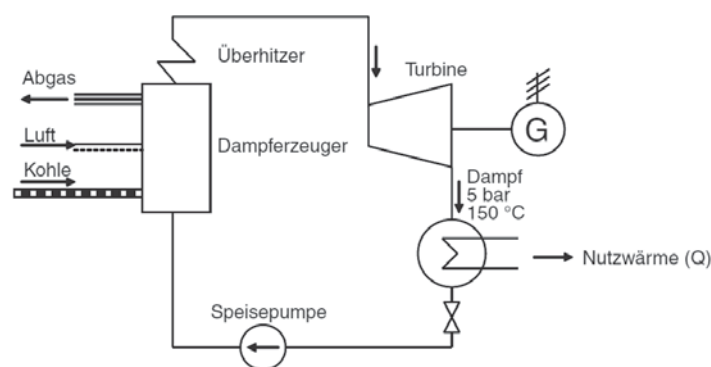


Abb. 2.1: Verfahrensskizze eines Dampfturbinenkraftwerkes [Sch10b]



Zu Beginn des 21. Jahrhunderts wurde vom damaligen Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit die Initiative COORETEC (CO₂-Reduktions-Technologien) ins Leben gerufen um die Steigerung des Wirkungsgrades von Kohlekraftwerken zu fördern. Innerhalb dieser Initiative werden zwei Strategien verfolgt: zum einen sollen die Wirkungsgrade von fossil befeuerten Kraftwerken gesteigert werden und zum zweiten Technologien entwickelt werden, die das frei werdende Kohlenstoffdioxid speichern [BMW03]. Ein Anstieg der Dampfparameter auf 700 °C und 35 MPa sowie die Verwendung von Trocken-Braunkohle (TBK) erhöht den Wirkungsgrad auf 50 Prozent (siehe Abb. 2.2). Durch die Abtrennung und Speicherung von Kohlenstoffdioxid (Carbon Dioxide Capture and Storage, CCS) sinkt der Wirkungsgrad durch den höheren Energieaufwand allerdings deutlich auf 38 bis 42 Prozent, die CO₂-Emissionen reduzieren sich jedoch um über 90 Prozent. [Mat10].

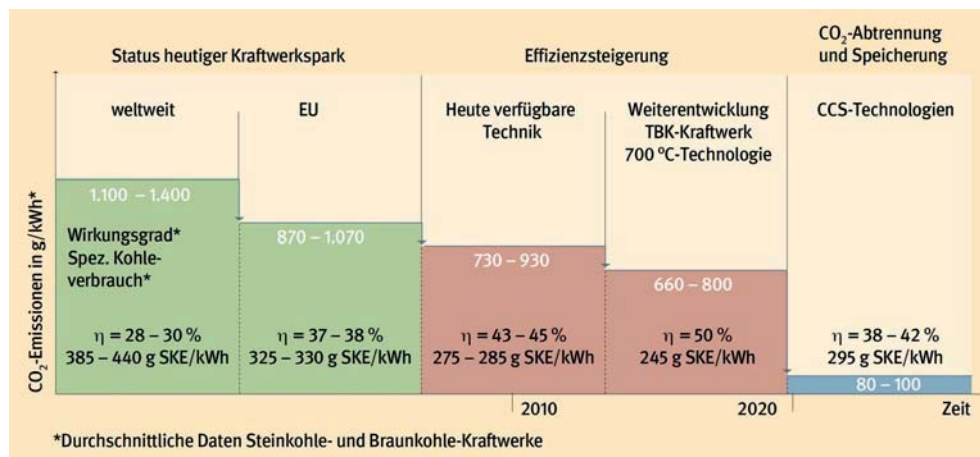


Abb. 2.2: CO₂-Emissionen bei kommerziellen Kraftwerken [Mat10]

2.1.2 Stahl-Werkstoffe in der Kraftwerkstechnik

Bauteile im Kraftwerksbau werden für mehr als 100.000 Betriebsstunden ausgelegt. Die Rohre und Komponenten, die den für die Energiegewinnung notwendigen Frischdampf führen, erfahren neben der thermischen Beanspruchung mechanische Belastungen durch den hohen herrschenden Innendruck. Aufgrund dessen werden an die verwendeten Hochtemperatur-Werkstoffe zahlreiche Anforderungen gestellt. Die hohen Betriebsdauern bei hoher Temperaturbeanspruchung setzen eine hohe thermische Langzeitstabilität des Materialgefüges voraus. Gleichzeitig müssen auch im mechanischen Bereich Langzeiteigenschaften wie Kriech- und Zeitstandfestigkeit, Mindestduktilität und Mindestzähigkeit gewährleistet werden. Durch die Verwendung von Frischdampf muss der Werkstoff der Frischdampf führenden Rohre und Komponenten auch im Hochtemperaturbereich korrosionsbeständig sein. Durch die hohen Sicherheitsauflagen sind eine reproduzierbare Herstellung, gute Be- und Verarbeitbarkeit sowie gute Schweißbarkeit notwendige Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe. [Bür11]

Einsatztemperaturen oberhalb 550 °C erfordern hochwärmefeste Stähle. Zu ihnen gehören die martensitischen CrMoV-Stähle mit neun bis zwölf Prozent Chrom [Bür11]. Martensit bildet sich beim schnellen Abkühlen von Austenit (γ -Mischkristall, Abb. 2.3) auf Temperaturen unterhalb der Martensitstarttemperatur. Dabei klappt das kubisch-flächenzentrierte Austenit-Gitter diffusionslos in ein tetragonal verzerrtes raum-zentriertes Gitter um. Bei neun bis zwölf Prozent Chrom erfolgt die Martensitbildung bereits bei Luftabkühlung und findet zwischen ca. 300 und 100 °C statt. Die Mikrostruktur besteht aus feinen Subkörnern oder einer Zellstruktur mit feinen Versetzungen innerhalb der Subkörner bzw. Zellen.

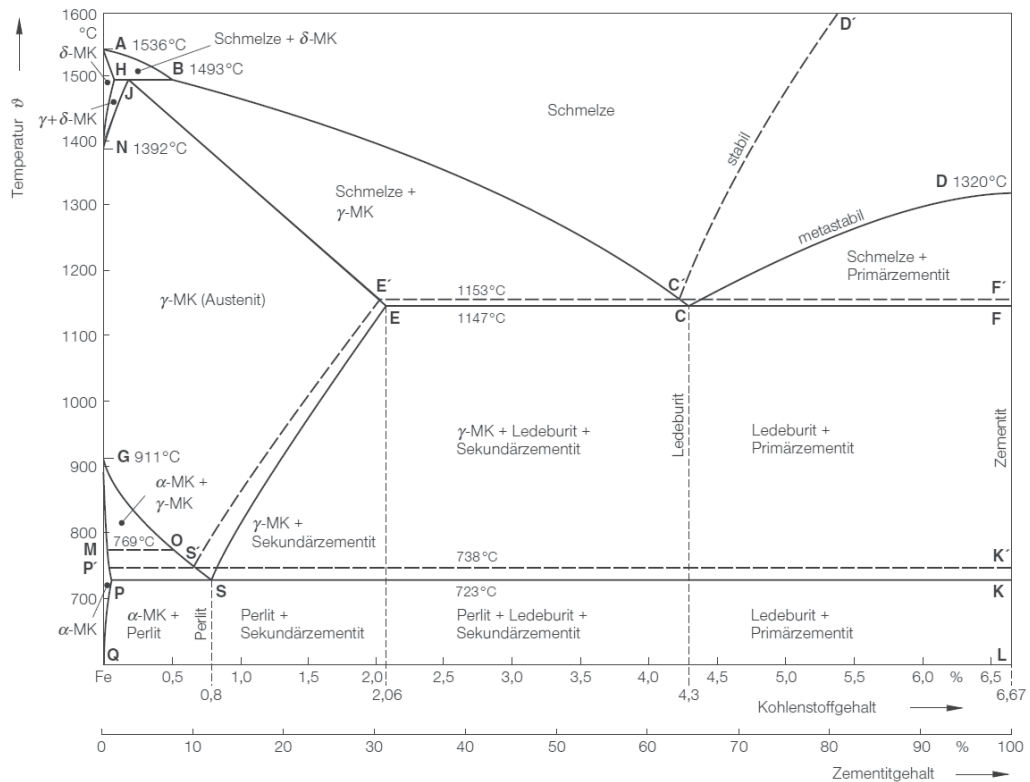


Abb. 2.3: Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm [Bar05]

Die martensitischen Stähle (z. B. X20, 9CrMoVNbN = P91, P92) besitzen nach einem Anlassen bei etwas oberhalb von 700 °C stabile, feindispers ausgeschiedene MX-Carbonitrid-Partikel (z. B. $M_{23}C_6$, $Nb(C,N)$, $V(C,N)$), die die Mikrostruktur stabilisieren. Durch diese Ausscheidungen erfährt der Werkstoff eine Ausscheidungshärtung und somit höhere Festigkeiten und eine gute Kriechbeständigkeit [Bür11]. Die MX-Ausscheidungen sind auch für die Kriechbeständigkeit der Chrom-Stähle bis ca. 600 °C verantwortlich. Bei Temperaturen oberhalb 600 °C lösen sich die MX-Carbonitride auf und es bilden sich aus den gleichen Elementen nitridische Z-Phasen ($Cr(V,Nb)N$) aus. Die gebildeten Z-Phasen besitzen deutlich größere Körner und tragen nicht zur Ausscheidungshärtung bei. Dadurch wird die gute Zeitstandsfestigkeit sowie die Kriechbeständigkeit der 9 – 12 % Chrom-Stähle deutlich reduziert [Bür11; Dan06]. Die martensitischen Stähle haben gegenüber den austenitischen Stählen den Vorteil eines geringeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten und einer besseren Wärmeleitfähigkeit. Dadurch kommt es bei An- und Abfahrvorgängen zu geringeren Eigenspannungen und darüber hinaus zu einer niedrigeren thermischen Ermüdung des Werkstoffes [Ber02].

Austenitische Stähle sind ebenfalls hochwarmfest [Bür11]. Diese weisen durch das dichter gepackte Gitter eine höhere Warmfestigkeit auf als kubisch-raumzentrierte Stähle (z. B. α -Ferrit). Des Weiteren haben austenitische Stähle eine kleinere Stapelfehler-Energie, welches ebenfalls zu einer höheren Warmfestigkeit führt, die bis ca. 800 °C genutzt werden kann. Hohe Nickelanteile stabilisieren das austenitische Gitter und erschweren die Umwandlung in Martensit oder Bainit. Die Kriechbeständigkeit dieser Stähle basiert auf der Ausscheidung feindisperser Karbide (MC mit $M = Ti, Nb$; $M_{23}C_6$ mit $M = Cr, Fe, Mo$) sowie hexagonaler Laves-Phasen (z. B. $Fe_2(Mo,W,Nb)$). Austenitische Stähle sind durch den hohen Chromanteil (18 bis 30 Prozent) besonders korrosionsbeständig. Nachteilig bei der Verwendung von Austenit-Stahl sind jedoch die Verwendung teurer Legierungselemente (Mo, Nb, W, V, Ti, Al,



N, B) sowie die höhere Thermoermüdungsempfindlichkeit, die aus dem höheren thermischen Ausdehnungskoeffizienten und einer geringeren Temperaturleitfähigkeit resultieren. Deshalb müssen Bauteile aus austenitischen Stählen sehr langsam aufgeheizt bzw. abgekühlt werden, welches gegen einen Einsatz in Kraftwerken spricht. [Ber02; Bür11]

Für Einsatztemperaturen oberhalb von 700 °C kommen aktuell Nickelbasis-Legierungen in Frage [Buc09; Kle10]. Nickelbasis-Legierungen (z. B. Alloy 617, Alloy 263, Alloy 740) zeigen hohe Festigkeiten, gute Zeitstandseigenschaften und Oxidationsbeständigkeit auch bei hohen Temperaturen. Die Festigkeit dieser Superlegierungen basiert auf Mischkristall- oder Ausscheidungsverfestigungen [Kle10]. Durch den hohen Nickelanteil und die schlechte Verarbeitbarkeit ist es aus aktueller Sicht nicht möglich, alle Komponenten, in denen 700 °C heißer Frischdampf geführt wird, aus Nickelbasis-Legierungen zu fertigen [Sch10a]. Die Herstellung ist sehr energieaufwendig und es werden teure und begrenzte Elemente (z. B. Nickel) verwendet.

2.2 Metall-Keramik-Verbunde

Metall-Keramik-Verbundstrukturen im Sinne der vorliegenden Arbeit sind keine Verbundwerkstoffe, die aus metallischen und keramischen Komponenten bestehen, sondern Werkstoffverbunde und Strukturen mit voneinander getrennten metallischen und keramischen Bestandteilen. Das Hauptproblem bei der Kombination dieser beiden Werkstoffklassen ist der große Unterschied der jeweiligen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Bei Temperaturgradienten innerhalb der Verbundstruktur treten dadurch hohe thermische Spannungen zwischen den Werkstoffen im Bauteil auf.

Stark verbreitet sind keramische Schutzschichten auf metallischen Substraten, bei denen die keramischen Eigenschaften die Lebensdauer der metallischen Bauteile deutlich erhöht und dadurch Rohstoffe eingespart werden können [Til05]. Durch die hohe chemische Beständigkeit gegenüber vielen Medien und Fluiden sowie dem geringen Verschleiß zeichnen sich monolithische Schichten als Korrosions- und Verschleißschutz aus. Hierfür wird beispielsweise Chromoxid durch Plasmaspritzen auf dem Stahlsubstrat abgeschieden [Bac99; Zim05]. Ein weiterer Anwendungsfall sind keramische Wärmedämmschichten, wodurch höhere Betriebstemperaturen ermöglicht werden und somit der Wirkungsgrad gesteigert werden kann. Stand der Technik ist Yttriumoxid stabilisiertes Zirkonoxid, welches beispielsweise als 100 µm starke Schicht die Temperatur von Turbinenteilen aus Nickelbasis-Legierungen um bis zu 150 °C senkt [Pet01].

Bei keramischen Beschichtungen auf Metall-Substraten, darf die kritische Schichtdicke nicht überschritten werden. Aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten treten ansonsten während der Pyrolyse von polymer-basierten Schichten und bei der späteren Anwendung hohe thermische Spannungen auf, die zu Rissen in der Schutzschicht führen [Bil96; Bor93; Tor08]. Jedoch stimmen keramische Schutzschichten nicht mit der Aufgabenstellung in Kapitel 1.2 überein, da die Schichten im Gegensatz zum Substrat sehr dünn sind. Die geplante Anwendung bezieht sich jedoch auf eine massive Keramik-Armierung, die das darunter befindliche Stahlrohr verstärken soll. Des Weiteren handelt es sich bei den genannten Schichten um monolithische Keramiken, die aufgrund ihrer geringen Schichtdicke die auftretenden Zugspannungen ertragen.



Im Gegensatz zu den oben beschriebenen keramischen Schichten sind auch Verbundbauteile aus Keramik und Metallen in der Literatur bekannt. Meier beschreibt die Entwicklung eines Stahl-Keramik-Verbundrohres für den Einsatz als Fliegerabwehr-Waffenrohr. Hierbei verbessert eine in den Stahlmantel eingeschumpfte monolithische Keramikhülse die Beständigkeit des Waffenrohres bei der Verwendung von Schießpulvern mit höherem Energiegehalt. Dies führt zu höheren Anfangsgeschwindigkeiten der Kugeln im Waffenlauf und somit zu höheren thermischen Belastungen und größerer Erosion. Durch den Einsatz einer keramischen Hülse erreicht das Rohr annähernd die bisherigen Lebensdauern [Mei92]. Da die Keramik innerhalb des Stahlrohres eingesetzt wird, ist die unterschiedliche thermische Ausdehnung in diesem Anwendungsbeispiel ohne Bedeutung, da der Stahl sich frei nach außen ausdehnen kann. Diese Anwendung widerspricht der Zielsetzung dieser Arbeit, da die Keramik auf Druck belastet wird.

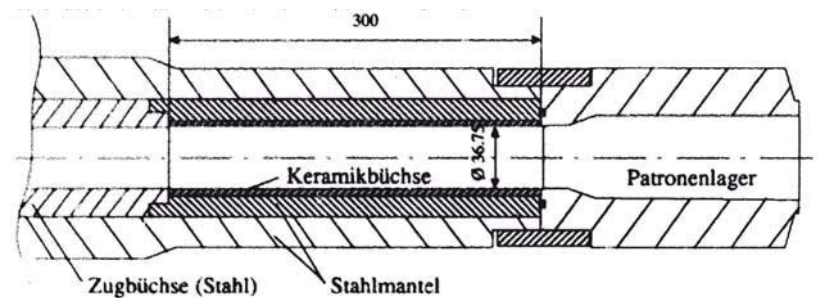


Abb. 2.4: Stahl-Keramik-Verbundrohr mit eingeschumpfter Keramikhülse [Mei92]

Die analytische Auslegung von ebenen sowie rohrförmigen Keramik-Metall-Verbundstrukturen wird in [Ger93] beschrieben. Die Prüfkörper werden im ebenen Fall über einen Lötprozess, im rohrförmigen Fall über Aufschumpfen des Stahlrohres auf das monolithische Keramikrohr hergestellt. Um auch faserverstärkte Keramikrohre, bei denen die Faserorientierung an den Lastfall angepasst werden kann, auszulegen, wird die Lösung auch für anisotrope Werkstoffe erweitert. Wie schon Maier [Mei92] belastet Gerhardy [Ger93] die Keramik auf Druck, da sie sich im Inneren des Stahlrohres befindet. Die in dieser Arbeit zu entwickelnde äußere Keramik-Armierung wird jedoch auf Zug durch die thermische Ausdehnung des innen liegenden Stahlrohres belastet.

Eine Zugbelastung des CMC-Werkstoffes sieht das Konzept dieser Arbeit, welches bereits in Kapitel 1.1 beschrieben wurde, vor [Mai07]. Die Offenlegungsschrift (Abb. 2.5) sieht das Ummanteln eines Druckbehälters mit einer Lage faserverstärkter Keramik und einer weiteren Lage ebenfalls aus CMC und/oder aus faserverstärktem Polymer vor. In der Offenlegungsschrift werden unterschiedliche Faser-Matrix-Kombinationen für die Faserkeramik genannt (SiC/SiC, C/C, C/SiC, Al₂O₃/ Al₂O₃, C/Siloxan, SiC/Siloxan und/oder Mullit/Mullit). Weiterhin wird erläutert, dass die Faserkeramik durch Wickeltechnik hergestellt werden muss. Die Armierung mit Faserkeramik soll eine Temperatursteigerung, des im Stahlrohr befindlichen Fluides, von derzeit maximal 620 °C auf 800 bis 850 °C ermöglichen [Mai07]. Anwendung könnte die Erfindung bei Frischdampfleitungen in einem Kraftwerk finden. Eine Erhöhung der Frischdampf Temperatur führt zu einer Verbesserung des Wirkungsgrades des Kraftwerkes (siehe Kapitel 2.1.1).

Das Prinzip der Festigkeitssteigerung von Rohren durch eine Ummantelung wird bereits 1949 von Ferrand [Fer51] für eine Innendruckbelastung bei Raumtemperatur gezeigt (Abb. 2.6). Für die Verstärkung werden Metalldrähte oder -bänder sowie Metallreifen verwendet. Die Streckgrenzen der Verstärkungselemente sind jeweils größer als die des zu verstärkenden Rohres.

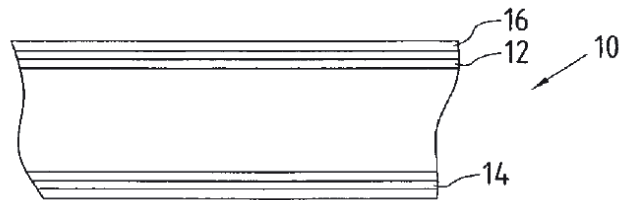


Abb. 2.5: Druckfester fluidbeaufschlagter Körper (10), bestehend aus einem Grundkörper aus Stahl (12), einer ersten CMC-Schicht (14) und einer weiteren Schicht (16) aus faserverstärktem Kunststoff und/oder Keramik [Mai07]

Erfindungsgemäß wird das Rohr mit Innendruck belastet und anschließend die Reifen angelegt. Die Metalldrähte bzw. -bänder werden spannungsfrei zwischen den Reifen aufgewickelt. Bei einem höheren Innendruck werden somit auch die Drähte belastet und es kann die Streckgrenze des Metallrohres überschritten werden.

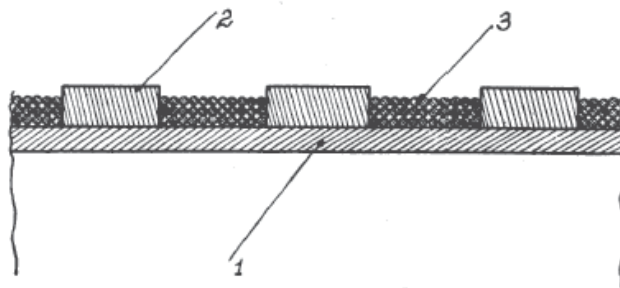


Abb. 2.6: Ummantelung eines Rohres (1) mit Metalldrähten (3) und -bändern (2) [Fer51]

Die Offenlegungsschrift [Pon70] beschreibt einen Hybridverbund, basierend auf einem gewellten Metallbehälter (Abb. 2.7). Der gewellte Metallbehälter wird mit einer Außenschicht aus glasfaserverstärktem Material armiert. In den Wellentälern befindet sich dazwischen ein elastisches, inkompressibles Füllmaterial. Bei Innendruck dehnt sich der Metall-Innenkörper insbesondere im Bereich des Füllmaterials aus und komprimiert dieses. Dadurch wird die Belastung an die glasfaserverstärkte Außenwand weitergeleitet. Das beschriebene Druckgefäß nutzt durch seinen Aufbau die Festigkeitseigenschaften des metallischen Innengefäßes sowie der glasfaserverstärkten Außenschicht.

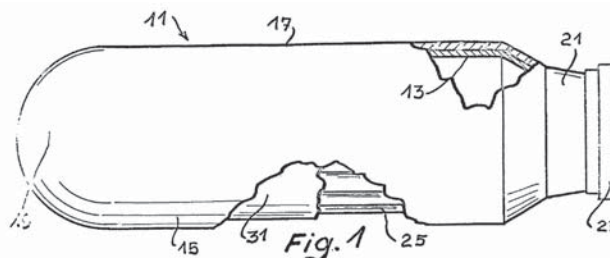


Abb. 2.7: Ummantelung eines gewellten Metallrohrs (13) mit einem glasfaserverstärkten Material (15) und einem inkompressiblem Füllmaterial (31) zwischen dem Metallrohr und der Armierung [Pon70]