

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
19. Juni 2025 (19.06.2025)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2025/124992 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

F16L 13/007 (2006.01) F16L 49/02 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2024/084471

(22) Internationales Anmeldedatum:
03. Dezember 2024 (03.12.2024)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2023 134 954.6
13. Dezember 2023 (13.12.2023) DE

(71) Anmelder: **BASF SE** [DE/DE]; Carl-Bosch-Strasse 38,
67056 Ludwigshafen am Rhein (DE).

(72) Erfinder: **KOLIOS, Grigorios**; Carl-Bosch-Straße 38,
67056 Ludwigshafen am Rhein (DE). **REITZ, Micha-**

el; Carl-Bosch-Straße 38, 67056 Ludwigshafen am Rhein
(DE). **LAIB, Heinrich**; Mannheimer Str. 16, 67117 Lim-
burgerhof (DE). **PRITZKOW, Walter E.C.**; Adam-Opel
Strasse 6, 70794 Filderstadt-Sielmingen (DE).

(74) Anwalt: **BASF IP ASSOCIATION**; BASF SE GBI -
Z078, 67056 Ludwigshafen (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW,
BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ,
DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH,
GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO,
JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR,
LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY,
MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,
QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST,

(54) Title: PIPE CONNECTION FOR THE END-FACE CONNECTION OF PIPE ELEMENTS

(54) Bezeichnung: ROHRVERBINDUNG ZUR STIRNSEITIGEN VERBINDUNG VON ROHRELEMENTEN

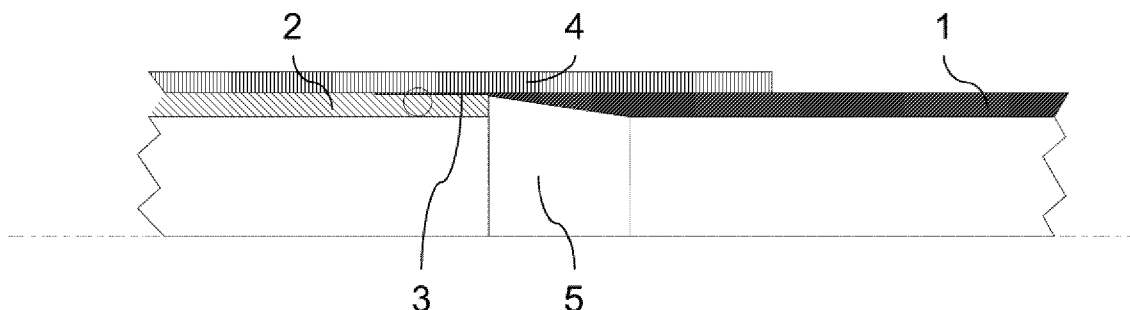


Fig. 1

(57) Abstract: The invention relates to a pipe connection for the end-face connection of pipe elements and to methods for the production thereof. The pipe connection comprises a first pipe element (1) made of a metal material, a second pipe element (2) made of a ceramic material, a sleeve (3) which is made of a metal material, is connected to the first pipe element (1) completely in the circumferential direction and spans the outer lateral surface of the second pipe element (2) completely in the circumferential direction and at least partially in the longitudinal direction, and a reinforcing layer (4) arranged on the outer lateral surface of the sleeve (3), wherein the reinforcing layer (4) is manufactured from a ceramic fibre composite material and is connected both to the outer lateral surface of the first pipe element (1) and to the outer lateral surface of the second pipe element (2).

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Rohrverbindung zur stirnseitigen Verbindung von Rohrelementen sowie Verfahren zu deren Herstellung. Die Rohrverbindung umfasst ein erstes Rohrelement (1) aus einem metallischen Werkstoff, ein zweites Rohrelement (2) aus einem keramischen Werkstoff, eine Hülse (3) aus einem metallischen Werkstoff, die mit dem ersten Rohrelement (1) in Umfangsrichtung vollständig verbunden ist und die äußere Mantelfläche des zweiten Rohrelements (2) in Umfangsrichtung vollständig und in Längsrichtung zumindest teilweise umspannt, sowie eine auf der äußeren Mantelfläche der Hülse (3) angeordnete Armierungsschicht (4), wobei die Armierungsschicht (4) aus einem keramischen Faserverbundwerkstoff gefertigt und sowohl mit der äußeren



SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ,
VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

- (84) Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

- hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, ein Patent zu beantragen und zu erhalten (Regel 4.17 Ziffer ii)
- Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)
- in Schwarz-Weiss; die internationale Anmeldung enthielt in ihrer eingereichten Fassung Farbe oder Graustufen und kann von PATENTSCOPE heruntergeladen werden.

Mantelfläche des ersten Rohrelements (1) als auch mit der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements (2) verbunden ist.

Rohrverbindung zur stirnseitigen Verbindung von Rohrelementen

Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine Rohrverbindung zur stirnseitigen Verbindung von Rohrelementen umfassend ein erstes Rohrelement aus einem metallischen Werkstoff, ein zweites Rohrelement aus einem keramischen Werkstoff, eine Hülse aus einem metallischen Werkstoff, die mit den beiden Rohrelementen verbunden ist, sowie eine auf der äußeren Mantelfläche der Hülse angeordnete Armierungsschicht.

Gattungsgemäße Rohrverbindungen sind aus dem Stand der Technik für unterschiedliche Einsatzzwecke bekannt. Ein Problem im Hinblick auf die dauerhafte Dichtigkeit stellt sich häufig bei Rohrverbindungen, bei denen die zu verbindenden Rohrelemente aus unterschiedlichen Materialien gefertigt sind, insbesondere wenn sich die Rohrelemente hinsichtlich ihrer Wärmeausdehnungskoeffizienten unterscheiden. Werden derartige Rohrelemente einer thermischen Belastung oder thermischen Wechselbelastung unterzogen, erfahren die Rohrelemente aufgrund ihrer Materialeigenschaften unterschiedliche Längenausdehnungen, was zu einer Undichtigkeit an der Rohrverbindung oder zu Schäden an den Rohrelementen, z.B. Rissen, führen kann.

Der Einsatz von Rohrelementen aus unterschiedlichen Materialien ist jedoch in einigen Anwendungen erwünscht oder erforderlich, beispielsweise in der Kraftwerkstechnik oder der chemischen Verfahrenstechnik. So hat es sich zum Beispiel bei Hochtemperaturprozessen bewährt, Rohrelemente aus keramischen Werkstoffen zu verwenden, da sie Vorteile gegenüber metallischen Werkstoffen aufweisen. Der Einsatz von Keramikrohren erfordert allerdings meist, dass eine Verbindung zwischen einem Rohrelement aus Metall und einem Rohrelement aus Keramik hergestellt werden muss – mit der oben geschilderten Problematik hinsichtlich der dauerhaften Dichtwirkung und der mechanischen Integrität der Verbindung.

Aus dem Stand der Technik sind Rohrverbindungen bekannt, die das Problem der unterschiedlichen Ausdehnung bei Wärmebelastung aufgreifen. So offenbart die Patentanmeldung US 2012/0003128 A1 eine Vorrichtung zur Verbindung eines Keramikrohres mit einem Metallrohr, bei der auf das Keramikrohr ein erster, innerer Schrumpfring aufgeschrumpft ist, der mit dem Metallrohr verbunden ist. Auf den ersten Schrumpfring ist ein zweiter, äußerer Schrumpfring montiert, der aus einem Material mit einem geringeren ther-

mischen Ausdehnungskoeffizienten als der erste Schrumpfring gefertigt ist. Bei einer thermischen Belastung durch Erhitzen der Rohrverbindung wird die Ausdehnung des ersten Schrumpfringes durch den zweiten Schrumpfring begrenzt.

Auch wenn diese Art der Verbindungstechnik für einen bestimmten Temperaturbereich und bestimmte Materialkombinationen geeignet ist, weist sie doch einige Nachteile auf. Zum einen kann es bei einer starken thermischen Belastung dazu kommen, dass sich der innere Schrumpfring trotz äußerer Begrenzung so weit ausdehnt, dass ein Ringspalt zwischen Keramikrohr und innerem Schrumpfring entsteht, wodurch die Verbindung undicht wird. Zum anderen ist es zur Montage des inneren Schrumpfringes auf das Keramikrohr erforderlich, den Schrumpfring stark zu erhitzen. Wird dann der heiße Schrumpfring auf das kühle Keramikrohr aufgebracht, kann dies zu einem thermischen Schock des Keramikmaterials und somit zu dessen Beschädigung oder Zerstörung führen.

Einen ähnlichen Ansatz zur Verbindung eines Keramikrohres mit einem Metallrohr offenbart das Dokument EP 1 795 794 A1. Über die Verbindungsstelle der beiden Rohre wird ein Schlauch aus einem elastomeren Material geschoben, der seinerseits vollumfänglich von einer Bandfeder umschlossen ist, die Druck nach innen auf das Elastomer ausübt. Auch bei dieser Art der Verbindungstechnik kann eine hinreichend große thermische Belastung, insbesondere eine starke thermische Wechselbelastung dazu führen, dass sich Undichtigkeiten einstellen, z.B. aufgrund einer plastischen Verformung des elastomeren Materials. Zudem ist der Einsatzbereich dieser Rohrverbindung auf einen relativ niedrigen Temperaturbereich beschränkt, da das elastomere Material bei hohen Temperaturen Schaden nimmt oder zerstört wird.

Es stellte sich die Aufgabe, gattungsgemäße Rohrverbindungen derart weiterzubilden, dass sie einerseits einfach herzustellen sind, und andererseits für ein breites Spektrum an thermischer Belastung einsetzbar sind, ohne dass es zu spontanen oder dauerhaften Undichtigkeiten kommt.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch eine Vorrichtung gemäß Anspruch 1 sowie ein Verfahren gemäß den Ansprüchen 9 und 10. Vorteilhafte Ausgestaltungen der Vorrichtung sind in den Ansprüchen 2 bis 8 angegeben.

Im Folgenden werden die Begriffe „haben“, „aufweisen“, „umfassen“ oder „einschließen“ oder beliebige grammatikalische Abweichungen davon in nicht-ausschließlicher Weise verwendet. Dementsprechend können sich diese Begriffe sowohl auf Situationen beziehen, in welchen, neben dem durch diese Begriffe eingeführten Merkmal, keine weiteren Merkmale

vorhanden sind, oder auf Situationen, in welchen ein oder mehrere weitere Merkmale vorhanden sind. Beispielsweise kann sich der Ausdruck „A hat B“, „A weist B auf“, „A umfasst B“ oder „A schließt B ein“ sowohl auf die Situation beziehen, in welcher, abgesehen von B, kein weiteres Element in A vorhanden ist (d.h. auf eine Situation, in welcher A ausschließlich aus B besteht), als auch auf die Situation, in welcher, zusätzlich zu B, ein oder mehrere weitere Elemente in A vorhanden sind, beispielsweise Element C, Elemente C und D oder weitere Elemente.

Weiterhin wird darauf hingewiesen, dass die Begriffe „mindestens ein“ und „ein oder mehrere“ sowie grammatikalische Abwandlungen dieser Begriffe oder ähnliche Begriffe, wenn diese in Zusammenhang mit einem oder mehreren Elementen oder Merkmalen verwendet werden und ausdrücken sollen, dass das Element oder Merkmal einfach oder mehrfach vorgesehen sein kann, in der Regel lediglich einmalig verwendet werden, beispielsweise bei der erstmaligen Einführung des Merkmals oder Elementes. Bei einer nachfolgenden erneuten Erwähnung des Merkmals oder Elementes wird der entsprechende Begriff „mindestens ein“ oder „ein oder mehrere“ in der Regel nicht mehr verwendet, ohne Einschränkung der Möglichkeit, dass das Merkmal oder Element einfach oder mehrfach vorgesehen sein kann.

Weiterhin werden im Folgenden die Begriffe „vorzugsweise“, „insbesondere“, „beispielsweise“ oder ähnliche Begriffe in Verbindung mit optionalen Merkmalen verwendet, ohne dass alternative Ausführungsformen hierdurch beschränkt werden. So sind Merkmale, welche durch diese Begriffe eingeleitet werden, optionale Merkmale, und es ist nicht beabsichtigt, durch diese Merkmale den Schutzzumfang der Ansprüche und insbesondere der unabhängigen Ansprüche einzuschränken. So kann die Erfindung, wie der Fachmann erkennen wird, auch unter Verwendung anderer Ausgestaltungen durchgeführt werden. In ähnlicher Weise werden Merkmale, welche durch „in einer Ausführungsform der Erfindung“ oder durch „in einem Ausführungsbeispiel der Erfindung“ eingeleitet werden, als optionale Merkmale verstanden, ohne dass hierdurch alternative Ausgestaltungen oder der Schutzzumfang der unabhängigen Ansprüche eingeschränkt werden soll. Weiterhin sollen durch diese einleitenden Ausdrücke sämtliche Möglichkeiten, die hierdurch eingeleiteten Merkmale mit anderen Merkmalen zu kombinieren, seien es optionale oder nicht-optionale Merkmale, unangetastet bleiben.

Maßangaben werden im Folgenden mit ihren üblichen Abkürzungen bezeichnet. So werden insbesondere die Einheiten Meter mit „m“, Millimeter mit „mm“, Mikrometer mit „µm“, Grad Celsius mit „°C“, Pascal mit „Pa“, Gigapascal mit „GPa“ und Prozent mit „%“ abgekürzt angegeben.

Ein Aspekt der Erfindung betrifft eine Rohrverbindung zur stirnseitigen Verbindung von Rohrelementen umfassend ein erstes Rohrelement aus einem metallischen Werkstoff, ein zweites Rohrelement aus einem keramischen Werkstoff, eine Hülse aus einem metallischen Werkstoff, die mit dem ersten Rohrelement in Umfangsrichtung vollständig verbunden ist und die äußere Mantelfläche des zweiten Rohrelements in Umfangsrichtung vollständig und in Längsrichtung zumindest teilweise umspannt, sowie eine auf der äußeren Mantelfläche der Hülse angeordnete Armierungsschicht, wobei die Armierungsschicht aus einem keramischen Faserverbundwerkstoff gefertigt und sowohl mit der äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements als auch mit der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements verbunden ist.

Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung einer stirnseitigen Verbindung von Rohrelementen umfassend die Schritte

- a) Bereitstellen eines ersten Rohrelements aus einem metallischen Werkstoff, eines zweiten Rohrelements aus einem keramischen Werkstoff und einer Hülse aus einem metallischen Werkstoff,
- b) in Umfangsrichtung vollständiges Verbinden der Hülse mit dem ersten Rohrelement,
- c) Befestigen der Hülse auf der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements, so dass die Hülse die äußere Mantelfläche des zweiten Rohrelements in Umfangsrichtung vollständig und in Längsrichtung zumindest teilweise umspannt,
- d) Anbringen einer Armierungsschicht aus einem keramischen Faserverbundwerkstoff auf der äußeren Mantelfläche der Hülse, und
- e) Verbinden der Armierungsschicht mit der äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements und mit der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements.

Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung einer stirnseitigen Verbindung von Rohrelementen umfassend die Schritte

- a) Bereitstellen eines ersten Rohrelements aus einem metallischen Werkstoff und eines zweiten Rohrelements aus einem keramischen Werkstoff,
- b) Herstellen einer Hülse aus einem metallischen Werkstoff um die Enden des ersten Rohrelements und des zweiten Rohrelements,
- c) in Umfangsrichtung vollständiges Verbinden der Hülse mit dem ersten Rohrelement,
- d) Befestigen der Hülse auf der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements, so dass die Hülse die äußere Mantelfläche des zweiten Rohrelements in Umfangsrichtung vollständig und in Längsrichtung zumindest teilweise umspannt,
- e) Anbringen einer Armierungsschicht aus einem keramischen Faserverbundwerkstoff auf der äußeren Mantelfläche der Hülse, und

- f) Verbinden der Armierungsschicht mit der äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements und mit der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements.

Der Begriff „Rohrelement“, wie er hier verwendet wird, ist ein weiter Begriff, dem seine gewöhnliche und gängige Bedeutung beigemessen werden soll, wie der Fachmann sie versteht. Der Begriff ist nicht beschränkt auf eine spezielle oder angepasste Bedeutung. Der Begriff kann, ohne Beschränkung, sich insbesondere auf ein hohles Bauteil beziehen, durch das ein fluides Medium geleitet werden kann. Dabei kann es sich beispielsweise um ein Rohr, ein Rohrsegment oder ein Endstück eines geraden oder gebogenen Rohres handeln. Weitere Beispiele sind rohrförmige Abschnitte anderer Bauteile, z.B. eines Flansches, Ventils oder Rohrbodens eines Reaktors oder Wärmetauschers.

Das erste Rohrelement kann jedes Rohrelement sein, das geeignet ist, mit dem zweiten Rohrelement verbunden zu werden, beispielsweise ein Rohr, ein Rohrsegment, ein Endstück eines geraden oder gebogenen Rohres oder ein rohrförmiger Abschnitt eines anderen Bauteils.

Der Außendurchmesser des ersten Rohrelements an seinem zur Verbindung mit dem zweiten Rohrelement vorgesehenen Ende beträgt bevorzugt von 6 mm bis 300 mm, besonders bevorzugt von 10 mm bis 200 mm, insbesondere von 15 mm bis 150 mm.

Der Außendurchmesser des ersten Rohrelements an seinem der Verbindung mit dem zweiten Rohrelement abgewandten Ende beträgt bevorzugt von 6 mm bis 300 mm, besonders bevorzugt von 10 mm bis 200 mm, insbesondere von 15 mm bis 150 mm.

Die Differenz zwischen dem größten Außendurchmesser und dem kleinsten Außendurchmesser des ersten Rohrelements beträgt bevorzugt von 0 mm bis 50 mm, besonders bevorzugt von 0 mm bis 40 mm, insbesondere von 0 mm bis 30 mm. Das Verhältnis dieser Durchmesserdifférenz zum Nenndurchmesser des ersten Rohrelements beträgt bevorzugt von 0 bis 0,05, besonders bevorzugt von 0 bis 0,02, insbesondere von 0 bis 0,01.

Die Länge des ersten Rohrelements beträgt bevorzugt von 20 mm bis 2000 mm, besonders bevorzugt von 30 mm bis 1500 mm, insbesondere von 50 mm bis 500 mm.

Die Wandstärke des ersten Rohrelements beträgt bevorzugt von 0,5 mm bis 20 mm, besonders bevorzugt von 1 mm bis 15 mm, insbesondere von 1 mm bis 10 mm. Die Differenz zwischen der größten Wandstärke und der kleinsten Wandstärke des ersten Rohrelements

ist bevorzugt kleiner als 10 mm, besonders bevorzugt kleiner als 7 mm, insbesondere kleiner als 5 mm.

Die Rauigkeit der äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements beträgt bevorzugt von 2 µm bis 100 µm, besonders bevorzugt von 10 µm bis 50 µm. Die Rauigkeit der inneren Mantelfläche des ersten Rohrelements beträgt bevorzugt von 2 µm bis 100 µm, besonders bevorzugt von 10 µm bis 50 µm. Die Ermittlung der Werte der Rauigkeit erfolgt nach einer Methode, wie sie in der DIN EN ISO 4287:1997 beschrieben ist.

Das erste Rohrelement ist aus einem metallischen Werkstoff gefertigt. Vorzugsweise ist der metallische Werkstoff ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus hochtemperaturfesten Edelstählen, Nickelbasislegierungen, Kupferbasislegierungen, austenitischen Eisenbasislegierungen und ferritischen Eisenbasislegierungen.

Weiterhin bevorzugt ist der metallische Werkstoff ausgewählt aus der Gruppe der Legierungen mit einer Werkstoffnummer n1.m1m2m3m4 nach DIN EN 10027-2:2015-07, wobei n1 der Ziffer 1, 2 oder 3, bevorzugt der Ziffer 1 oder 2 entspricht, m1 der Ziffer 0, 1, 3, 4 oder 8, bevorzugt der Ziffer 3 oder 4, besonders bevorzugt der Ziffer 4 entspricht, m2 der Ziffer 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 oder 9, bevorzugt der Nummer 4, 5, 6, 7, 8 oder 9 entspricht, m3 der Ziffer 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 oder 9 entspricht, und m4 der Ziffer 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 oder 9 entspricht.

In einer Ausführungsform kann der metallische Werkstoff ausgewählt sein aus der Gruppe der Legierungen mit der Werkstoffnummer 1.4m2m3m4, 2.08m3m4 und 2.4m2m3m4, wobei in diesem Fall m2 der Ziffer 4, 5, 6, 7, 8 oder 9 entspricht, m3 der Ziffer 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 oder 9 entspricht, und m4 der Ziffer 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 oder 9 entspricht.

In einer weiteren Ausführungsform kann der metallische Werkstoff ausgewählt sein aus der Gruppe der Legierungen mit der Werkstoffnummer 1.4767, 2.4633, 1.48m3m4 und 2.48m3m4, wobei in diesem Fall m3 der Ziffer 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 oder 9 entspricht, und m4 der Ziffer 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 oder 9 entspricht, beispielsweise 1.4841, 1.4852, 1.4876.

Der metallische Werkstoff kann beispielsweise eine ferritische Eisen-Chrom-Aluminium-Legierung (FeCrAl-Legierung) sein. FeCrAl-Legierungen umfassen beispielsweise Produkte, die unter dem Handelsnamen Kanthal® AF, Kanthal® A-1 und Kanthal® D vertrieben werden.

In einer Ausführungsform weist das erste Rohrelement eine Aufweitung auf, bei der sich in Richtung des stirnseitigen Endes der Innendurchmesser des ersten Rohrelements vergrößert. Vorzugsweise ist die äußere Mantelfläche des ersten Rohrelements im Bereich der Aufweitung zumindest teilweise von der Armierungsschicht überdeckt. Es hat sich herausgestellt, dass bei einem ersten Rohrelement mit einer von der Armierungsschicht zumindest teilweise überdeckten Aufweitung die Armierungsschicht besser auf der äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements haftet.

Der Begriff „Aufweitung“, wie er hier verwendet wird, ist ein weiter Begriff, dem seine gewöhnliche und gängige Bedeutung beigemessen werden soll, wie der Fachmann sie versteht. Der Begriff ist nicht beschränkt auf eine spezielle oder angepasste Bedeutung. Der Begriff kann, ohne Beschränkung, sich insbesondere auf jegliche Art der Vergrößerung des Innendurchmessers in Richtung des Endes des ersten Rohrelements beziehen.

Der Übergang vom kleinsten Innendurchmesser zum größten Innendurchmesser der Aufweitung kann kontinuierlich oder diskontinuierlich verlaufen. Vorzugsweise verläuft der Übergang kontinuierlich, sodass der Innendurchmesser in Richtung des Endes des ersten Rohrelements stetig zunimmt. Bevorzugt nimmt der Innendurchmesser in der Aufweitung linear zu, sodass der Innenraum der Aufweitung die Form eines Konus bzw. Kegelstumpfes aufweist. In diesem Fall ist der halbe Öffnungswinkel des Konus bevorzugt kleiner als 45° , besonders bevorzugt kleiner als 30° , insbesondere kleiner als 15° .

Der Außendurchmesser des ersten Rohrelements kann im Bereich der Aufweitung konstant bleiben oder variieren. Vorzugsweise ist der Außendurchmesser des ersten Rohrelements im Bereich der Aufweitung konstant. Die Wandstärke des ersten Rohrelements verringert sich in Richtung des Endes des ersten Rohrelements im Bereich der Aufweitung.

Die Länge der Aufweitung beträgt bevorzugt von 5 mm bis 200 mm, besonders bevorzugt von 10 mm bis 150 mm, insbesondere von 20 mm bis 100 mm. Unter der Länge der Aufweitung wird dabei die axiale Ausdehnung des Abschnitts des ersten Rohrelements verstanden, in dem sich der Innendurchmesser vergrößert.

In einer Ausgestaltung erstreckt sich die Aufweitung bis ans Ende des ersten Rohrelements, sodass das Ende der Aufweitung auch das Rohrende bildet. In einer anderen Ausgestaltung bildet die Aufweitung einen Übergangsabschnitt zwischen zwei Bereichen des ersten Rohrelements mit unterschiedlichen Innendurchmessern. Bei dieser Ausgestaltung geht das Ende der Aufweitung mit dem größeren Innendurchmesser vorzugsweise über in

einen Bereich mit konstantem Innendurchmesser, der sich bis zum Rohrende des ersten Rohrelements erstreckt.

In einer Ausführungsform weist das erste Rohrelement in einem von der Armierungsschicht überdeckten Bereich einen Abschnitt mit verringertem und/oder vergrößertem Außendurchmesser auf. Die Veränderung der Außenkontur bewirkt einen Formschluss zwischen dem ersten Rohrelement und der die äußere Mantelfläche überdeckenden Armierungsschicht, was sich vorteilhaft auf die Dauerbeständigkeit der Rohrverbindung auswirkt.

In einer Ausgestaltung dieser Ausführungsform weist der Abschnitt mindestens eine Einkerbung, mindestens eine Ausbuchtung oder sowohl mindestens eine Einkerbung und mindestens eine Ausbuchtung auf.

Der Begriff „Einkerbung“, wie er hier verwendet wird, ist ein weiterer Begriff, dem seine gewöhnliche und gängige Bedeutung beigemessen werden soll, wie der Fachmann sie versteht. Der Begriff ist nicht beschränkt auf eine spezielle oder angepasste Bedeutung. Der Begriff kann, ohne Beschränkung, sich insbesondere auf einen Abschnitt des ersten Rohrelements, in dem der Außendurchmesser gegenüber anderen Bereichen verringert ist, beziehen.

Die Einkerbung kann von unterschiedlicher Form sein. Die Einkerbung kann im Längsschnitt betrachtet beispielsweise die Form einer Halbkugel, einer Halbellipse, einer Sinusform, eines Dreiecks, eines Vierecks, eines Trapezes, eines Vielecks oder von Kombinationen daraus aufweisen. Die Form kann in Längsrichtung betrachtet symmetrisch oder unsymmetrisch sein. Die Übergänge von der nicht verringerten äußeren Mantelfläche zur Einkerbung können kantig oder abgerundet sein.

In Umfangsrichtung betrachtet kann es sich bei der Einkerbung um ein umlaufendes Gebilde handeln, dessen Form in Längsrichtung konstant oder variabel ist. Es kann sich aber auch um einzelne Elemente handeln, die über den Umfang der äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements verteilt angeordnet sind, beispielsweise symmetrisch oder unsymmetrisch.

Die Einkerbung kann auch in Längsrichtung betrachtet mehrere Vertiefungen oder Teilelemente aufweisen. Diese können identisch oder unterschiedlich sein. So kann beispielsweise auch ein auf der Mantelfläche sich befindendes Außengewinde, das in radialer Richtung in die äußere Mantelfläche hineinragt, als Einkerbung dienen.

Die Differenz zwischen dem nicht verringerten Außendurchmesser des ersten Rohrelements und dem geringsten Durchmesser der Einkerbung beträgt bevorzugt von 0,25 mm bis 10 mm, besonders bevorzugt von 0,5 mm bis 5 mm, insbesondere von 1 mm bis 3 mm.

Der Steigungswinkel der in Längsrichtung des Rohrelements kürzeren Flanke des Übergangs von dem nicht verringerten Außendurchmesser des ersten Rohrelements bis zum geringsten Außendurchmesser in dem Abschnitt der Einkerbung beträgt bevorzugt von 5° bis 60°, besonders bevorzugt von 10° bis 45°.

Der Begriff „Ausbuchtung“, wie er hier verwendet wird, ist ein weiterer Begriff, dem seine gewöhnliche und gängige Bedeutung beigemessen werden soll, wie der Fachmann sie versteht. Der Begriff ist nicht beschränkt auf eine spezielle oder angepasste Bedeutung. Der Begriff kann, ohne Beschränkung, sich insbesondere auf einen Abschnitt des ersten Rohrelements, in dem der Außendurchmesser gegenüber anderen Bereichen vergrößert ist, beziehen.

Die Ausbuchtung kann von unterschiedlicher Form sein. Die Ausbuchtung kann im Längsschnitt betrachtet beispielsweise die Form einer Halbkugel, einer Halbellipse, einer Sinusform, eines Dreiecks, eines Vierecks, eines Trapezes, eines Vielecks oder von Kombinationen daraus aufweisen. Die Form kann in Längsrichtung betrachtet symmetrisch oder unsymmetrisch sein. Die Übergänge von der nicht vergrößerten äußeren Mantelfläche zur Ausbuchtung können kantig oder abgerundet sein.

In Umfangsrichtung betrachtet kann es sich bei der Ausbuchtung um ein umlaufendes Gebilde handeln, dessen Form in Längsrichtung konstant oder variabel ist. Es kann sich aber auch um einzelne Elemente handeln, die über den Umfang der äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements verteilt angeordnet sind, beispielsweise symmetrisch oder unsymmetrisch.

Die Ausbuchtung kann auch in Längsrichtung betrachtet mehrere Erhebungen oder Teilelemente aufweisen. Diese können identisch oder unterschiedlich sein. So kann beispielsweise auch ein auf der Mantelfläche sich befindendes Außengewinde, das in radialer Richtung über die äußere Mantelfläche hinausragt, als Ausbuchtung dienen.

Die Differenz zwischen dem größten Durchmesser der Ausbuchtung und dem nicht vergrößerten Außendurchmesser des ersten Rohrelements beträgt bevorzugt von 0,25 mm bis 50 mm, besonders bevorzugt von 0,5 mm bis 30 mm, insbesondere von 1 mm bis 20 mm.

Der Steigungswinkel der in Längsrichtung des Rohrelements kürzeren Flanke des Übergangs von dem nicht vergrößerten Außendurchmesser des ersten Rohrelements bis zum größten Außendurchmesser in dem Abschnitt der Ausbuchtung beträgt bevorzugt von 5° bis 60° , besonders bevorzugt von 10° bis 45° .

Das zweite Rohrelement kann jedes Rohrelement sein, das geeignet ist, mit dem ersten Rohrelement verbunden zu werden, beispielsweise ein Rohr, ein Rohrsegment, ein Endstück eines geraden oder gebogenen Rohres oder ein rohrförmiger Abschnitt eines anderen Bauteils.

Der Außendurchmesser des zweiten Rohrelements an seinem zur Verbindung mit dem ersten Rohrelement vorgesehenen Ende beträgt bevorzugt von 6 mm bis 300 mm, besonders bevorzugt von 10 mm bis 200 mm, insbesondere von 15 mm bis 150 mm.

Die Wandstärke des zweiten Rohrelements beträgt bevorzugt von 0,5 mm bis 20 mm, besonders bevorzugt von 1 mm bis 15 mm, insbesondere von 1 mm bis 10 mm. Die Differenz zwischen der größten Wandstärke und der kleinsten Wandstärke des zweiten Rohrelements ist bevorzugt kleiner als 10 mm, besonders bevorzugt kleiner als 7 mm, insbesondere kleiner als 5 mm.

Das zweite Rohrelement ist aus einem keramischen Werkstoff gefertigt. Vorzugsweise ist der keramische Werkstoff ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus mindestens einer der Komponenten: ein binäres Oxid ($MxOz$), ein Mischoxid ($M1yM2vOz$), ein Metallcarbid ($M3vCw$), ein Metallnitrid ($M3vNw$), Mischungen aus binären Oxiden ($M1yOz / M2vOw$, $MxOz / M1yOz / M2vOw$), Mischungen aus Mischoxiden ($MxM1yOz / MuM2vOw$), Mischungen aus binären Oxiden und Metallcarbiden ($MxOz / M3vCw$) und/oder Mischungen aus binären Oxiden und Metallnitriden ($MxOz / M3vNw$). Dabei beziehen sich O auf das chemische Element Sauerstoff, C auf das chemische Element Kohlenstoff und N auf das chemische Element Stickstoff.

M kann beispielsweise ein Element sein, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus: Aluminium (Al), Zirkonium (Zr), Silizium (Si), Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Beryllium (Be), Yttrium (Y), Lanthan (La), Eisen (Fe), Nickel (Ni), Chrom (Cr), Wolfram (W), Hafnium (Hf), Strontium (Sr), Scandium (Sc), Cer (Ce), Ytterbium (Yb). Vorzugsweise kann M ein Element sein, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus: Aluminium, Zirkonium, Silizium, Yttrium, Lanthan, Hafnium, Strontium. Besonders bevorzugt ist M Aluminium, Zirkonium oder Yttrium.

M1 kann beispielsweise ein Element sein, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus: Aluminium (Al), Zirkonium (Zr), Yttrium (Y). Vorzugsweise kann M1 aus Aluminium bestehen.

M2 kann beispielsweise ein Element sein, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus: Zirkonium (Zr), Silizium (Si), Magnesium (Mg), Yttrium (Y), Titan (Ti).

M3 kann beispielsweise ein Element sein, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus: Aluminium (Al), Silizium (Si), Bor (B), Wolfram (W).

x, y, z, u, v und w können jeweils unabhängig voneinander zwischen 1 und 10, bevorzugt zwischen 1 und 7 und besonders bevorzugt zwischen 1 und 5 liegen.

Beispielsweise kann der keramische Werkstoff mindestens eine Mischung aufweisen ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus: binäre und ternäre Mischungen aus Aluminiumoxid (Al_2O_3), Zirkoniumoxid (ZrO_2) und Yttriumoxid (Y_2O_3) (z.B. Zirkoniumoxid-verstärktes Aluminiumoxid); Mischungen aus Siliziumcarbid (SiC) und Aluminiumoxid; Mischungen aus Aluminiumoxid und Magnesiumoxid (MgO -Spinell); Mischungen aus Aluminiumoxid und Siliziumoxid (Mullit); Mischung aus Aluminiumsilikaten und Magnesiumsilikaten, ternäre Mischungen aus Aluminiumoxid, Siliziumoxid und Magnesiumoxid (Cordierit); Steatit (Magnesiumsilikat); Zirkoniumoxid-verstärktes Aluminiumoxid; Stabilisiertes Zirkoniumoxid: Stabilisatoren in Form von Magnesiumoxid (MgO), Calciumoxid (CaO) oder Yttriumoxid, gegebenenfalls kommen auch Ceroxid (CeO_2), Scandiumoxid (ScO_3) oder Ytterbiumoxid (YbO_3) als Stabilisatoren zum Einsatz; ferner Aluminiumtitanat (stöchiometrische Mischung von Aluminiumoxid und Titanoxid, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$); Siliziumnitrid und Aluminiumoxid (Siliziumaluminiumoxinitride).

Als Zirkoniumoxidverstärktes Aluminiumoxid wird vorteilhaft Al_2O_3 mit 10 bis 20 Mol-% ZrO_2 eingesetzt. Zur Stabilisierung von ZrO_2 kann vorteilhaft 10 bis 20 Mol-%, bevorzugt 16 Mol-% CaO , 10 bis 20 Mol-%, bevorzugt 16 Mol-% MgO , oder 5 bis 10 Mol-% Y_2O_3 , bevorzugt 8 Mol-% Y_2O_3 ("vollstabilisiertes Zirkonoxid") oder 1 bis 5 Mol-% Y_2O_3 , bevorzugt 4 Mol-% ("teilstabilisiertes Zirkonoxid") verwendet werden. Als ternäre Mischung sind z.B. 80% Al_2O_3 , 18,4% ZrO_2 und 1,6% Y_2O_3 vorteilhaft.

Beispielsweise kann der keramische Werkstoff ausgewählt sein aus der Gruppe bestehend aus Quarzglas (SiO_2), Siliciumcarbid (SiC), Siliciumnitrid (Si_3N_4), Aluminiumnitrid (AlN), Korund (Al_2O_3), Zirconia (ZrO_2), Mullit oder Faserverbundwerkstoffe auf Basis dieser Komponenten.

Der keramische Werkstoff kann auch einen Verbundwerkstoff umfassen, beispielsweise einen Verbundwerkstoff aus mehreren Lagen von monolithischer Keramik und/oder oxidischer Faserverbundkeramik, wie er z.B. in den Dokumenten WO 2016/184776 A1 oder EP 3 835 639 A1 beschrieben ist.

Eine Hülse aus einem metallischen Werkstoff verbindet das erste Rohrelement und das zweite Rohrelement. Vorzugsweise ist der metallische Werkstoff der Hülse ausgewählt aus der Gruppe umfassend hochtemperaturfeste Edelstähle, Nickelbasislegierungen, Kupferbasislegierungen, austenitische Eisenbasislegierungen, ferritische Eisenbasislegierungen, Platingruppenmetalle (PGM), Refraktärmetalle, Gold und Silber. PGM umfassen die Elemente Platin, Palladium, Iridium, Rhodium, Osmium, Ruthenium und deren Legierungen. Refraktärmetalle umfassen die Elemente Titan (Ti), Zirkonium (Zr), Hafnium (Hf), Vanadium (V), Niob (Nb), Tantal (Ta), Chrom (Cr), Molybdän (Mo), Wolfram (W) sowie Legierungen, die diese Elemente als Hauptkomponente enthalten.

Vorzugsweise ist der metallische Werkstoff der Hülse ausgewählt aus der Gruppe der Legierungen mit einer Werkstoffnummer $n_1.m_1m_2m_3m_4$ nach DIN EN 10027-2:2015-07, wobei n_1 der Ziffer 1, 2, oder 3, bevorzugt der Ziffer 1 oder 2 entspricht, m_1 der Ziffer 0, 1, 3, 4, oder 8, bevorzugt der Ziffer 3 oder 4, besonders bevorzugt der Ziffer 4 entspricht, m_2 der Ziffer 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, oder 9, bevorzugt der Nummer 4, 5, 6, 7, 8 oder 9 entspricht, m_3 der Ziffer 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 oder 9 entspricht, und m_4 der Ziffer 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 oder 9 entspricht.

In einer Ausführungsform kann der metallische Werkstoff der Hülse ausgewählt sein aus der Gruppe der Legierungen mit der Werkstoffnummer $1.4m_2m_3m_4$, $2.4m_2m_3m_4$ und $2.08m_3m_4$, wobei in diesem Fall m_2 der Ziffer 4, 5, 6, 7, oder 8 entspricht, m_3 der Ziffer 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 oder 9 entspricht, und m_4 der Ziffer 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 oder 9 entspricht.

In einer weiteren Ausführungsform kann der metallische Werkstoff der Hülse ausgewählt sein aus der Gruppe der Legierungen mit der Werkstoffnummer 1.4767, 2.4633, $1.48m_3m_4$ und $2.48m_3m_4$, wobei in diesem Fall m_3 der Ziffer 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 oder 9 entspricht, und m_4 der Ziffer 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 oder 9 entspricht, beispielsweise 1.4841, 1.4852, 1.4876.

Der metallische Werkstoff der Hülse kann beispielsweise eine ferritische Eisen-Chrom-Aluminium-Legierung (FeCrAl-Legierung) sein. FeCrAl-Legierungen umfassen beispielsweise

Produkte, die unter dem Handelsnamen Kanthal® AF, Kanthal® A-1 und Kanthal® D vertrieben werden.

Bei dem metallischen Werkstoff der Hülse und dem metallischen Werkstoff des ersten Rohrelements kann es sich um die gleichen oder um unterschiedliche Werkstoffe handeln.

In einer Ausführungsform ist die Hülse stirnseitig mit dem ersten Rohrelement verbunden. Dabei kann die Hülse ein separates Bauteil, vorzugsweise ein rohrförmiges Bauteil sein, das stirnseitig mit dem Ende des ersten Rohrelements verbunden ist, beispielsweise verschweißt oder verlötet. Die Hülse kann auch ein integraler Bestandteil des ersten Rohrelements sein. In einer vorteilhaften Ausgestaltung bildet die Hülse den stirnseitigen Endabschnitt des ersten Rohrelements. Bei dieser Ausgestaltung kann die Hülse beispielsweise dadurch hergestellt werden, dass der Innendurchmesser des ersten Rohrelements im Bereich der Hülse gegenüber dem dahinter liegenden Bereich des ersten Rohrelements vergrößert ist, beispielsweise durch mechanisches Ausfräsen oder Ausdrehen des Rohrendes des ersten Rohrelements.

In einer weiteren Ausführungsform ist die Hülse ein separates Bauteil, das die äußere Mantelfläche des ersten Rohrelements an seinem zur Verbindung vorgesehenen Ende in Umfangsrichtung vollständig und in Längsrichtung zumindest teilweise umspannt. Die Hülse kann ein vorgefertigtes in Umfangsrichtung geschlossenes Bauteil sein, beispielsweise ein Hohlzylinder, das auf das Ende des ersten Rohrelements aufgeschoben wird. Die Hülse kann auch als Bauteil erst durch Zusammenfügen eines flächigen Elements wie einem Band oder einer Folie gebildet werden. Beispielsweise kann die Hülse dadurch hergestellt werden, dass ein Band aus einem metallischen Werkstoff um die äußere Mantelfläche des Endes des ersten Rohrelements gewickelt und befestigt wird. Die Hülse und die äußere Mantelfläche des ersten Rohrelements sind vorzugsweise dichtend verbunden. Eine dichtende Verbindung kann beispielsweise dadurch hergestellt werden, dass die Hülse auf das Ende des ersten Rohrelements aufgeschrumpft wird, oder dass die beiden Bauteile stoffschlüssig verbunden werden, beispielsweise durch Verschweißen oder Löten. Bevorzugt wird die Hülse mit der äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements in Umfangsrichtung umlaufend verschweißt. Die Länge der Überdeckung der äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements in Längsrichtung beträgt bevorzugt von 3 mm bis 300 mm, besonders bevorzugt von 5 mm bis 200 mm, insbesondere von 10 mm bis 100 mm.

Die Hülse umspannt die äußere Mantelfläche des zweiten Rohrelements in Umfangsrichtung vollständig und in Längsrichtung zumindest teilweise.

Die Hülse und die äußere Mantelfläche des zweiten Rohrelements sind vorzugsweise dichtend verbunden. Eine dichtende Verbindung kann beispielsweise dadurch hergestellt werden, dass die Hülse auf das Ende des zweiten Rohrelements aufgeschrumpft wird, oder dass die beiden Bauteile stoffschlüssig verbunden werden, beispielsweise durch Löten oder Kleben. Bevorzugt wird die Hülse mit der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements in Umfangsrichtung umlaufend verlötet. Die Länge der Überdeckung der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements durch die Hülse in Längsrichtung beträgt bevorzugt von 3 mm bis 300 mm, besonders bevorzugt von 5 mm bis 200 mm, insbesondere von 10 mm bis 100 mm. Die äußere Mantelfläche des zweiten Rohrelements kann in dem Bereich, der von der Hülse überdeckt ist, einen verringerten Außendurchmesser aufweisen. In einer Ausgestaltung ist der Außendurchmesser der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements um den Wert der Materialstärke der Hülse verringert, sodass sich nach dem Aufbringen der Hülse in Längsrichtung betrachtet eine ebene Fläche ohne Kante oder Versatz ergibt.

Das Material, die Form und die Dimensionen der Hülse können den jeweiligen Anforderungen entsprechend gewählt werden.

Vorzugsweise beträgt die Wandstärke der Hülse von 0,03 mm bis 0,7 mm, besonders bevorzugt von 0,1 mm bis 0,5 mm. Der Innendurchmesser der Hülse im befestigten Zustand beträgt vorzugsweise von 6 mm bis 300 mm, besonders bevorzugt von 10 mm bis 200 mm, insbesondere von 20 mm bis 150 mm.

Die Maßtoleranz im Durchmesser der Hülse beträgt bevorzugt von 0 μm bis 150 μm , besonders bevorzugt von 0 μm bis 90 μm , insbesondere von 0 μm bis 60 μm , wobei unter der Maßtoleranz die Abweichung des Maßes eines Bauteils vom Sollmaß (Nennmaß) zu verstehen ist. Das Verhältnis der Maßtoleranz der Hülse zu ihrem Innendurchmesser beträgt bevorzugt von 0 bis 0,006, besonders bevorzugt von 0 bis 0,004, insbesondere von 0 bis 0,003.

Die Rundheitstoleranz der Hülse beträgt bevorzugt von 0 μm bis 150 μm , besonders bevorzugt von 0 μm bis 90 μm , insbesondere von 0 μm bis 60 μm , wobei unter der Rundheitstoleranz die Abweichung zwischen den beiden konzentrischen Kreisen in der zur Achse der Hülse senkrechten Ebene, zwischen welchen die Umfangslinien aller Querschnitte der Hülse liegen, zu verstehen ist.

Die Zylindrizitätstoleranz der Hülse beträgt bevorzugt von 0 μm bis 150 μm , besonders bevorzugt von 0 μm bis 90 μm , insbesondere von 0 μm bis 60 μm , wobei unter der Zylindrizitätstoleranz die Abweichung zwischen den beiden koaxialen Zylindern, zwischen welchen die Mantelfläche der Hülse liegt, zu verstehen ist.

Die Rauheit der Hülse auf ihrer Innenseite, bestimmt nach den Vorgaben der Norm DIN EN ISO 4287:1997, beträgt bevorzugt von 0,025 μm bis 3,2 μm , besonders bevorzugt von 0,1 μm bis 1,6 μm .

Im Bereich der Überdeckung durch die Hülse beträgt die Maßtoleranz der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements bevorzugt von -60 μm bis 60 μm , besonders bevorzugt von -40 μm bis 40 μm , wobei unter der Maßtoleranz die Abweichung des Maßes eines Bauteils vom Sollmaß (Nennmaß) zu verstehen ist.

Die Rundheitstoleranz der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements im Bereich der Überdeckung durch die Hülse beträgt bevorzugt von -60 μm bis 60 μm , besonders bevorzugt von -40 μm bis 40 μm , wobei unter der Rundheitstoleranz die Abweichung zwischen den beiden konzentrischen Kreisen in der zur Achse der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements senkrechten Ebene, zwischen welchen die Umfangslinien aller Querschnitte der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements liegen, zu verstehen ist.

Die Zylindrizitätstoleranz der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements im Bereich der Überdeckung durch die Hülse beträgt bevorzugt von -60 μm bis 60 μm , besonders bevorzugt von -40 μm bis 40 μm , wobei unter der Zylindrizitätstoleranz die Abweichung zwischen den beiden koaxialen Zylindern, zwischen welchen die äußere Mantelfläche des zweiten Rohrelements liegt, zu verstehen ist.

Die Rauheit der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements im Bereich der Überdeckung durch die Hülse, bestimmt nach den Vorgaben der Norm DIN EN ISO 4287:1997, beträgt bevorzugt von 0,025 μm bis 3,2 μm , besonders bevorzugt von 0,1 μm bis 1,6 μm .

Zur stoffschlüssigen Verbindung der Innenseite der Hülse mit der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements kann ein Klebstoff verwendet werden.

Ein Kleber kann beispielsweise sein:

- Ein Keramikkleber, beispielsweise die Produkte des Hersteller Cotronics Corporation mit den Handelsnamen Resbond™ 904 oder Resbond™ 989
- Ein Glaskleber oder Glaslote, beispielsweise die Produkte des Herstellers Schott mit den Handelsnamen G018-346, G018-358, G018-385.

- Ein oder mehrere Füllstoffe und Pasten, beispielsweise die Produkte des Herstellers Nohtec GmbH mit den Handelsnamen ZYROBOND® INOX GARD oder ZYRO-BOND® HTW PASTE, des Herstellers INTERFLON mit Handelsnamen HT 1200 oder des Herstellers Adolf Würth GmbH mit dem Handelsnamen HSP 1400.

Im Verarbeitungszustand ist die Viskosität des Klebers im Bereich von 10^2 mPa*s bis 10^8 mPa*s, bevorzugt im Bereich von 10^3 bis 10^7 mPa*s, besonders bevorzugt im Bereich von 10^4 bis 10^6 mPa*s.

Ferner ist im Verarbeitungszustand der Anteil an organischen Bestandteilen im Bereich von 0 bis 5 gew.-%, bevorzugt im Bereich von 0 bis 2 gew.-%, besonders bevorzugt im Bereich von 0 bis 1 gew.-%.

Im Endzustand weisen die Klebeverbindungen bevorzugt folgende Eigenschaften auf:

- Die maximale Anwendungstemperatur ist im Bereich von 600 bis 1800°C, bevorzugt im Bereich von 800 bis 1600°C, besonders bevorzugt im Bereich von 1000 bis 1400°C.
- Die Korrosionsbeständigkeit ist in oxidierender Atmosphäre und in reduzierender Atmosphäre gegeben.
- Die Permeabilität ist im Bereich von 0 bis 10 Darcy, bevorzugt im Bereich von 0 bis 1 Darcy, besonders bevorzugt im Bereich von 0 bis 0,1 Darcy.

Ferner kann zur stoffschlüssigen Verbindung der Innenseite der Hülse mit der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements ein Lot verwendet werden. Der Begriff „Lot“, wie er hier verwendet wird, ist ein weiterer Begriff, dem seine gewöhnliche und gängige Bedeutung beigemessen werden soll, wie der Fachmann sie versteht. Der Begriff ist nicht beschränkt auf eine spezielle oder angepasste Bedeutung. Der Begriff kann, ohne Beschränkung, sich insbesondere auf ein Material beziehen, das geeignet ist, die Haftung zwischen einem metallischen Werkstoff und einem keramischen Werkstoff zu verbessern.

Vorzugsweise ist der Werkstoff des Lots ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Gold (Au), Platin (Pt), Palladium (Pd) sowie Legierungen von mindestens zwei der Elemente Gold, Silber (Ag), Palladium, Nickel (Ni), Kobalt (Co), Kupfer (Cu), Mangan (Mn).

Besonders bevorzugt ist der Werkstoff des Lots ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Gold, Platin, Palladium sowie Legierungen von Silber und Palladium (Ag/Pd); Gold, Kupfer und Nickel (Au/Cu/Ni); Gold und Palladium (Au/Pd); Gold, Palladium und Mangan (Au/Pd/Mn); Gold, Palladium und Nickel (Au/Pd/Ni); Gold, Nickel, Palladium, Mangan und Kupfer (Au/Ni/Pd/Mn/Cu); Palladium und Kobalt (Pd/Co); Palladium und Nickel (Pd/Ni); Palladium, Nickel, Kupfer und Silber (Pd/Ni/Cu/Ag); wobei die Legierungen jeweils noch Spuren weiterer Elemente enthalten können.

Besonders bevorzugt ist der Werkstoff des Lots ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Gold sowie Legierungen von Gold und Palladium (Au/Pd); Gold, Palladium und Nickel (Au/Pd/Ni); Palladium und Kobalt (Pd/Co); Palladium und Nickel (Pd/Ni); Palladium, Nickel, Kupfer und Silber (Pd/Ni/Cu/Ag); wobei die Legierungen jeweils noch Spuren weiterer Elemente enthalten können.

Derartige edelmetallhaltige Hartlote sind beispielsweise als Produkte der Firma Morgan Advanced Materials plc (www.morganbrazealloys.com) unter den Produkt- bzw. Markennamen Nicoro (Au/Cu/Ni), Palco (Pd/Co), Palmansil5 (Au/Pd/Mn), Palni (Pd/Ni), Palnicurom25 (Au/Ni/Pd/Mn/Cu), Palnicusil (Pd/Ni/Cu/Ag), Palniro1 (Au/Pd/Ni), Palniro4 (Au/Pd/Ni), Palniro7 (Au/Pd/Ni), Paloro (Au/Pd), Palsil10 (Ag/Pd), kommerziell verfügbar.

Die Schmelztemperatur des Lots beträgt bevorzugt von 1120°C bis 1350°C, besonders bevorzugt von 1150°C bis 1300°C, insbesondere von 1160°C bis 1240°C. Die Erstarrungstemperatur des Lots beträgt bevorzugt von 1100°C bis 1300°C, besonders bevorzugt von 1120°C bis 1280°C, insbesondere von 1150°C bis 1250°C.

Auf der äußeren Mantelfläche der Hülse ist eine Armierungsschicht angeordnet, die sowohl mit der äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements als auch mit der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements verbunden ist.

Der Begriff „Armierungsschicht“, wie er hier verwendet wird, ist ein weiterer Begriff, dem seine gewöhnliche und gängige Bedeutung beigemessen werden soll, wie der Fachmann sie versteht. Der Begriff ist nicht beschränkt auf eine spezielle oder angepasste Bedeutung. Der Begriff kann, ohne Beschränkung, sich insbesondere auf eine Schicht aus einem Werkstoff, die geeignet ist, die beiden Rohrelemente der Rohrverbindung dauerhaft zu verbinden und die Festigkeit der Rohrverbindung zu erhöhen, beziehen.

Die Armierungsschicht kann mehrere Einzelschichten umfassen oder eine zusammenhängende Schicht als flächiges Gebilde sein. Beispielsweise kann die Armierungsschicht mehrere in Längsrichtung der Rohrverbindung verlaufende einzelne Schichten umfassen, die jeweils sowohl mit der äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements als auch mit der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements verbunden sind. Vorzugsweise ist die Armierungsschicht als eine zusammenhängende flächige Schicht ausgebildet, die die Hülse in Längsrichtung und in Umfangsrichtung komplett umschließt.

Die Verbindung der Armierungsschicht mit dem ersten Rohrelement und mit dem zweiten Rohrelement kann auf unterschiedliche Arten erfolgen, beispielsweise durch Kraftschluss, Formschluss, Stoffschluss oder Kombinationen daraus.

Eine Verbindung durch Kraftschluss kann beispielsweise dadurch hergestellt werden, dass der Querschnitt der Armierungsschicht nach der Fertigstellung geringer ist als während des Anbringens der Armierungsschicht. Durch die Querschnittsreduzierung wird die Armierungsschicht auf die von ihr überdeckten Bereiche der Hülse, des ersten Rohrelements und des zweiten Rohrelements gepresst und erzeugt dadurch eine kraftschlüssige Verbindung. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn der keramische Faserverbundwerkstoff der Armierungsschicht zunächst aufgebracht und die Rohrverbindung anschließend gebrannt wird.

Eine Verbindung durch Formschluss kann beispielsweise dadurch hergestellt werden, dass die Armierungsschicht Bereiche des ersten Rohrelements und/oder des zweiten Rohrelements überdeckt, die eine derart gestaltete Geometrie aufweisen, dass ein Verrutschen oder Lösen der Verbindung unmöglich wird. Dies ist beispielsweise der Fall bei Ausführungsformen, bei denen das erste Rohrelement in einem von der Armierungsschicht überdeckten Bereich einen Abschnitt mit verringertem und/oder vergrößertem Außendurchmesser aufweist.

Eine Verbindung durch Stoffschluss kann beispielsweise durch Löten, Schweißen, Kleben oder Kombinationen daraus hergestellt werden. Vorzugsweise werden stoffschlüssige Verbindungen durch Löten oder Schweißen, insbesondere durch Schweißen hergestellt.

Die Stärke der Armierungsschicht in radialer Richtung kann vorzugsweise von 0,25 mm bis 8 mm, besonders bevorzugt von 0,5 mm bis 6 mm, insbesondere von 1 mm bis 5 mm betragen. Das Verhältnis der Stärke der Armierungsschicht zur Wandstärke der Hülse kann vorzugsweise von 2 bis 100, besonders bevorzugt von 4 bis 50 sein.

Die Länge der Überdeckung der äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements durch die Armierungsschicht in Längsrichtung kann vorzugsweise von 3 mm bis 300 mm, besonders bevorzugt von 5 mm bis 200 mm, insbesondere von 10 mm bis 100 mm betragen.

Die Länge der Überdeckung der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements durch die Armierungsschicht in Längsrichtung kann vorzugsweise mindestens 3 mm, besonders bevorzugt mindestens 5 mm, insbesondere mindestens 10 mm betragen. Vorzugsweise überdeckt die Armierungsschicht die äußere Mantelfläche des zweiten Rohrelements mindestens zu 50 %, bevorzugt mindestens zu 75 %, besonders bevorzugt zu 100 %.

Die Armierungsschicht ist aus einem keramischen Faserverbundwerkstoff gefertigt. Die Begriffe "Verbundwerkstoff" und "Faserverbundwerkstoff", wie sie hier verwendet werden, sind weite Begriffe, denen ihre gewöhnliche und gängige Bedeutung beigemessen werden soll, wie der Fachmann sie versteht. Die Begriffe sind nicht beschränkt auf eine spezielle oder angepasste Bedeutung. Der Begriff "Verbundwerkstoff" kann, ohne Beschränkung, sich insbesondere auf ein beliebiges Material beziehen, das aus zwei oder mehr Bestandteilen hergestellt ist. Diese Bestandteile können deutlich unterschiedliche chemische oder physikalische Eigenschaften aufweisen und können zu einem Material mit Eigenschaften verschmolzen werden, die sich von den einzelnen Materialien unterscheiden. Innerhalb des Verbundwerkstoffes können die einzelnen Materialien getrennt bleiben.

Der Begriff "Faserverbundwerkstoff" kann, ohne Beschränkung, sich insbesondere auf ein beliebiges Material beziehen, das im Allgemeinen mindestens zwei Hauptkomponenten umfasst: Verstärkungsfasern und eine Einbettungsmatrix, die als Füllstoff und/oder Klebstoff zwischen den Fasern dienen kann. Gegenseitige Wechselwirkungen zwischen den beiden Komponenten können dem Gesamtmaterial höherwertige Eigenschaften verleihen als jede der beiden beteiligten Komponenten alleine. Der faserverstärkte Verbundwerkstoff kann insbesondere die Fasern als diskontinuierliche oder dispergierte Phase, die Matrix als kontinuierliche Phase und einen Zwischenphasenbereich umfassen, der auch als Grenzfläche bezeichnet werden kann.

Der Begriff "keramischer Faserverbundwerkstoff" („Ceramic Matrix Composite“, "CMC"), wie er hier verwendet wird, ist ein weiterer Begriff, dem seine gewöhnliche und gängige Bedeutung beigemessen werden soll, wie der Fachmann sie versteht. Der Begriff ist nicht beschränkt auf eine spezielle oder angepasste Bedeutung. Der Begriff kann, ohne Beschränkung, sich insbesondere auf einen beliebigen Verbundwerkstoff beziehen, insbesondere auf einen beliebigen faserverstärkten Verbundwerkstoff, der eine Vielzahl von keramischen Fasern umfasst, die in eine keramische Matrix eingebettet sind. In diesem Zusammenhang können auch Kohlenstoff und Kohlenstofffasern als keramische Materialien angesehen werden.

Der Begriff "oxidkeramischer Faserverbundwerkstoff" („Oxide Ceramic Matrix Composite“, "OCMC"), wie er hier verwendet wird, ist ein weiterer Begriff, dem seine gewöhnliche und gängige Bedeutung beigemessen werden soll, wie der Fachmann sie versteht. Der Begriff ist nicht beschränkt auf eine spezielle oder angepasste Bedeutung. Der Begriff kann, ohne Beschränkung, sich insbesondere auf einen beliebigen keramischen Matrixverbund bezie-

hen, der eine oxidkeramische Matrix umfasst, die durch oxidkeramische Verstärkungsfasern verstärkt ist. Bei OCMCs kann es sich um faserverstärkte Verbundwerkstoffe handeln, die ein Fasergerüst umfassen, das in eine poröse Matrix aus Oxidkeramik eingebettet ist. Der Begriff „OCMC“ kann sich auf Strukturen mit einem rein keramischen Fasergerüst beziehen oder auf Strukturen, deren Fasergerüst neben keramischen Fasern weitere Fasern aus mindestens einem weiteren Material, z.B. Metallfasern, umfassen.

Vorteile solcher OCMCs können eine hohe Temperaturbeständigkeit bis zu 1300 °C oder mehr in oxidierender oder reduzierender Atmosphäre, eine hohe Temperaturwechselbeständigkeit und ein quasi-duktils Verformungs- und Bruchverhalten sein. Eine offene Porosität ϵ von Faserverbundkeramiken kann in der Regel Werte zwischen 5 % und 50 % annehmen. Eine Bruchzähigkeit der OCMC kann Werte von $KIC \cong 10 - 50 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}}$ erreichen. Aufgrund der porösen Struktur können Faserverbundkeramiken im Vergleich zu monolithischen Keramiken mit gleicher chemischer Zusammensetzung eine geringere Dichte, einen geringeren Elastizitätsmodul und einen niedrigeren Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten aufweisen.

Die folgende Tabelle enthält eine Liste der einschlägigen Normen für die Bestimmung dieser Parameter, insbesondere eine Liste der einschlägigen Normen für die Bestimmung der strukturellen, mechanischen und thermophysikalischen Parameter für monolithische Keramik und für OCMC.

Parameter	Monolithische Keramik	OCMC
Dichte, offene Porosität	DIN EN 623-2	DIN V ENV 1389
Elastizitätsmodul	DIN V ENV 843-2	DIN EN 658-1
Bruchzähigkeit ¹	DIN EN ISO 15732	Einseitig gekerbte Biegung ²
Wärmedurchgangskoeffizient	DIN EN 821-2	DIN V ENV 1159-2
Spezifische Wärmekapazität	DIN EN 821-3	DIN V ENV 1159-3
1: Die Bruchzähigkeit von metallischen Werkstoffen wird nach DIN EN ISO 12737 bestimmt.		
2: M. Kuntz. Risswiderstand keramischer Faserverbundwerkstoffe. Dissertation Universität Karlsruhe, p. 52-58, Shaker Verlag, 1996.		

Der Wärmeleitfähigkeitskoeffizient wird durch die folgende Beziehung definiert: Wärmeleitfähigkeitskoeffizient = Dichte x (spezifische Wärmekapazität) x Wärmediffusionskoeffizient.

In der folgenden Tabelle werden beispielhaft die Eigenschaften von monolithischer Keramik und OCMC auf der Basis von Aluminiumoxid miteinander verglichen.

Parameter	Monolithische Keramik (z.B. Degussit® AL23)	OCMC (z.B. WHIPOX® N610/45)
Offene Porosität in %	0	26
Dichte in (g/cm ³)	3,8	2,9
Elastizitätsmodul in <i>Gpa</i>	380	110
Wärmeleitfähigkeitskoeffizient in W/(m*K)	30 (bei 100°C) 5,5 (bei 1000°C)	5,7 (bei 200°C) 2,7 (bei 1000°C)

Das Fasergerüst, das auch als “Fasergewebe” bezeichnet wird, kann ein homogenes Fasergerüst oder ein Hybridfasergerüst sein. Unter einem “homogenen Fasergerüst” wird ein Fasergerüst verstanden, das ausschließlich Fasern des gleichen Typs beinhaltet, beispielsweise in Bezug auf das Material, aus dem die Fasern gefertigt sind.

Unter einem “Hybridfasergerüst” wird ein Fasergerüst verstanden, das mindestens zwei unterschiedliche Typen von Fasern umfasst. In einer Ausführungsform umfasst das Fasergerüst sowohl Fasern aus einem keramischen Werkstoff, vorzugsweise aus einem oxidkeramischen Werkstoff, als auch Fasern aus einem metallischen Werkstoff. Die Fasern aus keramischem Werkstoff werden nachfolgend auch als “keramische Fasern” oder “Keramikfasern”, die Fasern aus metallischem Werkstoff als “metallische Fasern” oder “Metallfasern” bezeichnet.

Metallische Fasern können aus mindestens einem Werkstoff hergestellt sein. Vorzugsweise ist der Werkstoff ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Eisenbasislegierungen, Nickelbasislegierungen, Platingruppenmetallen (PGM) und Refraktärmetallen.

In einer Ausführungsform ist der Werkstoff ausgewählt aus der Gruppe der Legierungen mit einer Werkstoffnummer n1.m1m2m3m4 nach DIN EN 10027-2:2015-07, wobei n1 der Ziffer 1, 2 oder 3, bevorzugt der Ziffer 1 oder 2 entspricht, m1 der Ziffer 0, 1, 3, 4 oder 8, bevorzugt der Ziffer 3 oder 4, besonders bevorzugt der Ziffer 4 entspricht, m2 der Ziffer 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 oder 9, bevorzugt der Nummer 4, 5, 6, 7, 8 oder 9 entspricht, m3 der Ziffer 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 oder 9 entspricht, und m4 der Ziffer 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 oder 9 entspricht.

In einer Ausführungsform ist der Werkstoff eine ferritische Eisen-Chrom-Aluminium-Legierung (FeCrAl-Legierung). FeCrAl-Legierungen umfassen beispielsweise Produkte, die unter dem Handelsnamen Kanthal® AF, Kanthal® A-1 und Kanthal® D vertrieben werden.

Die Metallfasern können aus mehreren einzelnen Litzen hergestellt sein. Eine derartige Metallfaser kann beispielsweise von 4 bis 100 Litzen, bevorzugt von 6 bis 50 Litzen, besonders bevorzugt von 10 bis 30 Litzen umfassen. Die Stärke der einzelnen Litzen beträgt vorzugsweise von 10 µm bis 150 µm, bevorzugt von 15 µm bis 100 µm. Die Metallfasern können vorzugsweise einen Elastizitätsmodul von 40 GPa bis 400 GPa, bevorzugt von 80 GPa bis 200 GPa aufweisen.

Keramische Fasern können aus mindestens einem Werkstoff hergestellt sein. Vorzugsweise ist der Werkstoff ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus mindestens einer der Komponenten: ein binäres Oxid (M_xO_z), ein Mischoxid der Formel $M_1xM_2yO_z$, ein Mischoxid der Formel $M_1xM_2yM_3wO_z$, Mischungen aus binären Oxiden (M_1yO_z / M_2vO_w), Mischungen aus Mischoxiden ($M_xM_1yO_z$ / $M_uM_2vO_w$) und/oder einem Metallecarbidge (M_xC_y). Dabei bezieht sich O auf das chemische Element Sauerstoff und C auf das chemische Element Kohlenstoff.

M kann beispielsweise ein Element sein, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus: Aluminium (Al), Zirkonium (Zr), Silizium (Si), Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Beryllium (Be), Yttrium (Y), Lanthan (La), Eisen (Fe), Nickel (Ni), Chrom (Cr), Wolfram (W), Hafnium (Hf), Strontium (Sr), Scandium (Sc), Cer (Ce), Ytterbium (Yb). Vorzugsweise kann M ein Element sein, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus: Aluminium, Zirkonium, Silizium, Yttrium, Lanthan, Strontium.

M1 kann beispielsweise ein Element sein, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus: Aluminium (Al), Zirkonium (Zr), Yttrium (Y). Vorzugsweise kann M1 Aluminium sein. M2 kann beispielsweise ein Element sein, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus: Zirkonium (Zr), Silizium (Si), Magnesium (Mg), Yttrium (Y). M3 kann beispielsweise Kobalt (Co) sein.

X, y, u, v und w können jeweils unabhängig voneinander zwischen 1 und 10, bevorzugt zwischen 1 und 7 und besonders bevorzugt zwischen 1 und 5 liegen. Z kann zwischen 1 und 30, bevorzugt zwischen 1 und 20 und besonders bevorzugt zwischen 1 und 10 liegen.

In einer Ausführungsform sind die keramischen Fasern ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Mullit, Aluminiumoxid (Al_2O_3), einer Mischung aus Mullit und Aluminiumoxid.

Das Fasergerüst kann beispielsweise als Folie, Matte, insbesondere als Endlosmatte, oder als Endlosfilamente hergestellt werden. Das Fasergerüst kann mit bekannten Techniken hergestellt werden, beispielsweise durch Weben, Stricken, Flechten, Nähen.

Das Fasergerüst kann in zweidimensionaler oder dreidimensionaler Ausrichtung hergestellt werden. In der zweidimensionalen Ausrichtung sind die Fasern im Wesentlichen nur entlang einer Ebene in x-Richtung und y-Richtung des Materials ausgerichtet. In der dreidimensionalen Ausrichtung sind die Fasern in x-Richtung, y-Richtung und z-Richtung ausgerichtet. Das Fasergerüst kann auch als Faservorformling, Faserskelett oder Fasergewebe bezeichnet werden.

Das Fasergewebe kann spezifisch in einem Webmuster gewebt sein, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus: unidirektional, Leinwandbindung, Köper K1/2, Köper K2/2, Köper K1/3, Köper 4/4, Atlas A1/4, Atlas A1/7. Bevorzugte Webmuster können Köper 2/2, Köper 4/4, Atlas 1/4, Atlas 1/7 und insbesondere Köper 4/4, Atlas 1/4 und Atlas 1/7 sein. Das Fasergewebe kann insbesondere in einem Winkel von 0/90° oder in einem Winkel von 45°, bevorzugt im Winkel von 0/90° laminiert sein. Unter dem Begriff "Laminieren" wird in diesem Zusammenhang der Arbeitsvorgang während der Herstellung von OCMC-Bauteilen verstanden, bei dem Gewebelagen mit Schlicker getränkt und übereinandergeschichtet werden.

In einer Ausführungsform ist das Fasergewebe ein Hybridfasergewebe, das sowohl metallische Fasern als auch keramische Fasern umfasst. Der Anteil und die Verteilung der metallischen Fasern und der keramischen Fasern kann je nach Anforderung an die Rohrverbindung variieren. Beispielsweise kann das Verhältnis von Metallfasern zu Keramikfasern von 0,001 bis 1000, bevorzugt von 0,01 bis 100, besonders bevorzugt von 0,02 bis 50 betragen.

Bei einem Hybridfasergewebe, das Kettfäden und Schussfäden umfasst, können die Metallfasern Kettfäden, Schussfäden oder sowohl Kettfäden als auch Schussfäden sein. Die Keramikfasern können ebenso Kettfäden, Schussfäden oder sowohl Kettfäden als auch Schussfäden sein. Bevorzugt werden Metallfasern als Schussfäden eingesetzt. Die Anordnung und Verteilung von Metallfasern und Keramikfasern im Hybridfasergewebe kann gleichmäßig oder ungleichmäßig sein.

In einer Ausführungsform eines Metall-Keramik-Hybridfasergewebes ist der Anteil der metallischen Fasern an dem am ersten Rohrelement anliegenden Ende der Armierungsschicht

größer als der Anteil der keramischen Fasern, wohingegen der Anteil der keramischen Fasern an dem am zweiten Rohrelement anliegenden Ende der Armierungsschicht größer ist als der Anteil der metallischen Fasern. In dem Teil der Armierungsschicht, der am ersten Rohrelement anliegt, ist der Anteil der Metallfasern somit höher als in dem Teil der Armierungsschicht, die am zweiten Rohrelement anliegt. Vorzugsweise verringert sich der Anteil der Metallfasern von der einen Seite der Armierungsschicht zur anderen Seite der Armierungsschicht annähernd stetig. Die Ausgestaltung mit einer ungleichmäßigen Verteilung der Metallfasern hat mehrere vorteilhafte Auswirkungen. Der veränderliche Anteil der Metallfasern in Längsrichtung der Armierungsschicht führt dazu, dass die Armierungsschicht über Ihre Länge unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten aufweist. Dadurch wird einem Spannungsbruch oder einer Ablösung der Armierungsschicht von den übrigen Bauteilen vorgebeugt. Weiterhin ermöglicht ein Anteil an Metallfasern im Endbereich der Armierungsschicht auf Seiten des ersten Rohrelements eine stoffschlüssige Verbindung zwischen den Metallfasern der Armierungsschicht und der äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements, beispielsweise durch Löten oder Schweißen.

In einer Ausführungsform umfasst der keramische Faserverbundwerkstoff der Armierungsschicht metallische Fasern, die zumindest teilweise an der Oberfläche der Armierungsschicht zugänglich sind und stoffschlüssig mit der äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements verbunden, vorzugsweise verschweißt, sind.

Hierbei kann bevorzugt eine stoffschlüssige Verbindung zwischen der Innenseite der Hülse und der Außenseite des zweiten Rohrelements erreicht werden. Die Temperaturbeständigkeit der Verbindungselemente ist bevorzugt größer als 1200°C, die HT-Festigkeit der Metallhülse ist bevorzugt kleiner als 100 MPa, das HT-E-Modul der Metallhülse ist bevorzugt kleiner als 100 GPa und die Passung zwischen der Hülse und dem zweiten Rohrelement ist bevorzugt eine Gleitpassung, bei der die Hülse und das zweite Rohrelement aufeinander gleiten können.

Die Armierungsschicht kann mehrere Lagen von Fasergeweben umfassen, die vorzugsweise übereinander angeordnet sind. Eine derartige mehrlagige Armierungsschicht kann beispielsweise dadurch hergestellt werden, dass mehrere Lagen an Fasergeweben nacheinander um die Hülse und die angrenzenden Bereiche des ersten Rohrelements und des zweiten Rohrelements gewickelt werden.

Bei mehrlagigen Armierungsschichten können gleichartige oder unterschiedliche Fasergewebe übereinandergeschichtet werden. In einer Ausführungsform können ausschließlich homogene Fasergewebe in mehreren Lagen angeordnet sein. In einer weiteren Ausführungsform können ausschließlich Hybridfasergewebe in mehreren Lagen angeordnet sein.

In einer weiteren Ausführungsform können homogene Fasergewebe und Hybridfasergewebe in mehreren Lagen angeordnet sein. Die homogenen Fasergewebe umfassen dabei vorzugsweise Keramikfasern, die Hybridfasergewebe Keramikfasern und Metallfasern. Vorzugsweise wechseln dabei Lagen von Hybridfasergeweben mit Lagen von homogenen Fasergeweben ab, sodass sich eine Sandwich-Anordnung der unterschiedlichen Gewebearten ergibt.

Die Anzahl an Armierungslagen, die Hybridfasergewebe umfassen, kann vorzugsweise von 1 bis 30, besonders bevorzugt von 1 bis 25, insbesondere von 1 bis 20 betragen. Bei Ausführungsformen mit unterschiedlichen Arten von Geweben beträgt der Anteil der Lagen an Hybridfasergewebe in Bezug auf die Gesamtzahl der Lagen bevorzugt von 10 % bis 100 %, besonders bevorzugt von 20 % bis 75 %.

Die keramische Matrix, in die die Fasern eingebettet sind, kann aus mindestens einem Werkstoff hergestellt sein. Vorzugsweise ist der Werkstoff ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus mindestens einer der Komponenten: ein binäres Oxid ($MxOz$), ein Mischoxid der Formel $M1xM2yOz$, ein Mischoxid der Formel $M1xM2yM3wOz$, Mischungen aus binären Oxiden ($M1yOz / M2vOw$) und/oder Mischungen aus Mischoxiden ($MxM1yOz / MuM2vOw$). Dabei bezieht sich O auf das chemische Element Sauerstoff und C auf das chemische Element Kohlenstoff.

M kann beispielsweise ein Element sein, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus: Aluminium (Al), Zirkonium (Zr), Silizium (Si), Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Beryllium (Be), Yttrium (Y), Lanthan (La), Eisen (Fe), Nickel (Ni), Chrom (Cr), Wolfram (W), Hafnium (Hf), Strontium (Sr), Scandium (Sc), Cer (Ce), Ytterbium (Yb). Vorzugsweise kann M ein Element sein, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus: Aluminium, Zirkonium, Silizium, Yttrium, Lanthan, Strontium.

M1 kann beispielsweise ein Element sein, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus: Aluminium (Al), Zirkonium (Zr), Yttrium (Y). Vorzugsweise kann M1 Aluminium sein. M2 kann beispielsweise ein Element sein, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus: Zirkonium (Zr), Silizium (Si), Magnesium (Mg), Yttrium (Y). Vorzugsweise kann M2 Silizium sein. M3 kann beispielsweise Kobalt (Co) sein.

X, y, u, v und w können jeweils unabhängig voneinander zwischen 1 und 10, bevorzugt zwischen 1 und 7 und besonders bevorzugt zwischen 1 und 5 liegen. Z kann zwischen 1 und 30, bevorzugt zwischen 1 und 20 und besonders bevorzugt zwischen 1 und 10 liegen.

In einer Ausführungsform ist der Werkstoff der keramischen Matrix ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus mindestens einer der Komponenten: Silizium enthaltende Mischoxide der Formeln SixMyOz , SixM1yM2wOz und/oder SixByNzCw , Aluminiumnitrid (AlN), Aluminium enthaltende binäre Oxide (AlxOz). Dabei bezieht sich O auf das chemische Element Sauerstoff, B auf das chemische Element Bor, N auf das chemische Element Stickstoff und C auf das chemische Element Kohlenstoff.

In einer Ausführungsform umfasst der Werkstoff der keramischen Matrix eine Mischung aus Aluminiumoxid (Al_2O_3) und Zirkoniumdioxid (ZrO_2). Vorzugsweise beträgt der Gewichtsanteil von Al_2O_3 an der gesamten Mischung von 50 % bis 100 %, besonders bevorzugt von 70 % bis 95 %, insbesondere von 80 % bis 90 %. Der Gewichtsanteil von ZrO_2 an der gesamten Mischung beträgt vorzugsweise von 0 % bis 50 %, besonders bevorzugt von 5 % bis 30 %, insbesondere von 10 % bis 20 %. Das Verhältnis des Gewichtsanteils von ZrO_2 zum Gewichtsanteil von Al_2O_3 beträgt vorzugsweise von 0 bis 0,5, besonders bevorzugt von 0,1 bis 0,25.

Es hat sich herausgestellt, dass eine erfindungsgemäße Rohrverbindung, bei der einer Armierungsschicht aus einem keramischen Faserverbundwerkstoff sowohl mit der äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements als auch mit der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements verbunden ist, sowohl mechanisch stabil als auch gasdicht ist. Die Rohrverbindung hält auch großen Temperaturwechseln in kurzer Folge ohne Beschädigung und ohne Auftreten einer Undichtigkeit stand.

Eine separate Maßnahme zur Abdichtung der Bauteile gegeneinander ist nicht zwingend erforderlich, jedoch möglich. Der Begriff „Dichtung“ oder „Abdichtung“, wie er hier verwendet wird, ist ein weiterer Begriff, dem seine gewöhnliche und gängige Bedeutung beigemessen werden soll, wie der Fachmann sie versteht. Der Begriff ist nicht beschränkt auf eine spezielle oder angepasste Bedeutung.

Beispiele für Dichtungen sind Flachdichtungen oder Stopfbuchsdichtungen aus Graphit oder Glimmer sowie Linsendichtungen oder O-Ringdichtungen aus Metall. Dichtungen können auch dadurch hergestellt sein, dass Bauteile wie die Enden der Rohrelemente und/oder eine Hülse formschlüssig und/oder stoffschlüssig miteinander verbunden sind.

Dichtungen können beispielsweise zwischen dem ersten Rohrelement und der Hülse, zwischen dem ersten Rohrelement und der Armierungsschicht, zwischen dem zweiten Rohrelement und der Hülse oder zwischen dem zweiten Rohrelement und der Armierungsschicht vorhanden sein. In einer bevorzugten Ausführungsform ist zwischen der äußeren

Mantelfläche des zweiten Rohrelements und der Innenfläche der Hülse eine in Umfangsrichtung umlaufende Dichtung angebracht.

Weitere Einzelheiten und Merkmale der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung von bevorzugten Ausführungsbeispielen, insbesondere in Verbindung mit den Unteransprüchen. Hierbei können die jeweiligen Merkmale für sich alleine oder zu mehreren in Kombination miteinander verwirklicht sein. Die Erfindung ist nicht auf die Ausführungsbeispiele beschränkt. Die Ausführungsbeispiele sind in den Zeichnungen schematisch dargestellt. Die Zeichnungen sind als Prinzipdarstellungen zu verstehen. Sie stellen keine Beschränkung der Erfindung dar, beispielsweise im Hinblick auf konkrete Abmessungen oder Ausgestaltungsvarianten. Gleiche Bezugsziffern in den einzelnen Zeichnungen bezeichnen dabei gleiche oder funktionsgleiche bzw. hinsichtlich ihrer Funktionen einander entsprechende Elemente.

Im Einzelnen zeigen:

- Fig. 1 Längsschnitt durch eine Rohrverbindung gemäß einer ersten erfindungsgemäßen Ausführungsform;
- Fig. 2 Längsschnitt durch eine Rohrverbindung gemäß einer zweiten erfindungsgemäßen Ausführungsform;
- Fig. 3 Längsschnitt durch einen Abschnitt eines ersten Rohrelements mit vergrößertem Außendurchmesser;
- Fig. 4 Längsschnitt durch eine Rohrverbindung gemäß einer dritten erfindungsgemäßen Ausführungsform;
- Fig. 5 Längsschnitt durch eine Rohrverbindung gemäß einer ersten erfindungsgemäßen Ausführungsform, wobei die Wandstärke der Hülse abgesetzt ist;
- Fig. 6 Längsschnitt durch eine Rohrverbindung gemäß einer ersten erfindungsgemäßen Ausführungsform, wobei die Wandstärke der Hülse abgesetzt und die Randzone der Armierung geschlitzt ist.
- Fig. 7 Detailansicht der Fuge zwischen der Hülse und dem Rohrelement 2 bei aufgeschumpfter Hülse
- Fig. 8 Detailansicht der Fuge bei stoffschlüssiger Verbindung zwischen der Hülse und dem Rohrelement 2

Ausführungsbeispiele

Fig. 1 zeigt schematisch einen Längsschnitt durch eine Rohrverbindung gemäß einer ersten erfindungsgemäßen Ausführungsform. Die Rohrverbindung ist rotationssymmetrisch aufgebaut, die gestrichelte Linie in Fig. 1 bezeichnet die Symmetrieachse. Ein erstes Rohrelement 1 und ein zweites Rohrelement 2 sind an ihren Stirnseiten über eine Hülse aus einem metallischen Werkstoff 3 miteinander verbunden.

Das erste Rohrelement 1 ist aus einem metallischen Werkstoff gefertigt, beispielsweise aus Alloy 800 H (Werkstoffnummer 1.4876 gemäß DIN EN 10027-2). Sein Innendurchmesser beträgt beispielsweise 42 mm, sein Außendurchmesser 50 mm.

Das erste Rohrelement 1 weist eine Aufweitung 5 auf, bei der sich in Richtung des stirnseitigen Endes der Innendurchmesser des ersten Rohrelements 1 vergrößert. Der Übergang vom kleinsten Innendurchmesser des ersten Rohrelements 1 vor der Aufweitung 5 bis zum größten Innendurchmesser am Ende der Aufweitung 5 erfolgt in diesem Beispiel linear. Der sich daraus ergebende Konus der Aufweitung 5 hat beispielsweise eine Länge in axialer Richtung von 30 mm, der halbe Öffnungswinkel des Konus beträgt $7,5^\circ$.

Die Hülse 3 bildet den stirnseitigen Endabschnitt des ersten Rohrelements 1 und ist somit integral und in Umfangsrichtung vollständig mit diesem verbunden. Die Wandstärke der Hülse 3 kann beispielsweise 0,25 mm bis 0,3 mm betragen. Der Außendurchmesser des ersten Rohrelements 1 ist über seine gesamte Länge konstant. Die Hülse 3 und die Aufweitung 5 können beispielsweise dadurch hergestellt sein, dass ein Fräswerkzeug oder ein Drehwerkzeug an das stirnseitige Ende des ursprünglichen ersten Rohrelements herangeführt wird und durch spanenden Materialabtrag den vergrößerten Innenquerschnitt der Hülse 3 sowie den Konus der Aufweitung 5 erzeugt. Die Länge der Hülse 3 kann beispielsweise 30 mm bis 50 mm betragen. Der Innendurchmesser der Hülse kann beispielsweise 49 mm betragen. Der Innendurchmesser der Hülse kann beispielsweise mit einer H7-Passung oder einer H8-Passung ausgeführt sein. Im Bereich der Passung kann die Innenwand der Hülse 3 einen Mittenrauwert Ra gemäß DIN EN ISO 4287 kleiner als $1,6 \mu\text{m}$ aufweisen.

Das zweite Rohrelement 2 ist aus einem keramischen Werkstoff gefertigt, beispielsweise aus Alsint 99,7 (Handelsname der Firma Morgan Advanced Materials Haldenwanger GmbH, Waldkraiburg, Deutschland). Sein Innendurchmesser beträgt beispielsweise 42 mm, sein Außendurchmesser 50 mm. Das Ende des zweiten Rohrelements 2 kann auf einer Länge von beispielsweise 20 mm bis 50 mm mit einem Durchmesser von 49 mm und einer Passung f7, h7 oder h8 ausgeführt werden. Die Verringerung des Durchmessers im Bereich der Passung kann beispielsweise dem Ausgleich von Maßabweichungen oder Formabweichungen des zweiten Rohrelements nach dem Brand dienen. Im Bereich

der Passung kann die Außenwand des zweiten Rohrelements einen Mittenrauwert Ra gemäß DIN EN ISO 4287 kleiner als 1,6 µm aufweisen.

Zur Befestigung der Hülse 3 auf der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements 2 kann der Innendurchmesser der Hülse 3 ohne Spiel auf den Außendurchmesser der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements 2 abgestimmt sein, sodass die Hülse 3 passgenau auf die Stirnseite des zweiten Rohrelements 2 aufgeschoben werden kann. In einer alternativen Variante der Befestigung wird die Hülse 3 erhitzt, sodass sie sich ausdehnt, und anschließend im erhitzten Zustand auf die Stirnseite des zweiten Rohrelements 2 aufgeschoben. Nach der Abkühlung der Hülse 3 verringert sich deren Innendurchmesser, so dass sie auf der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements 2 aufgeschrumpft ist. Die Hülse 3 umspannt das zweite Rohrelement 2 somit in Umfangsrichtung vollständig und in Längsrichtung teilweise. Optional kann vor der Montage der Hülse 3 auf der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements 2 ein Lot in Form einer Folie oder Paste aufgetragen sein.

Auf der äußeren Mantelfläche der Hülse 3 ist eine Armierungsschicht 4 angeordnet, die aus einem keramischen Faserverbundwerkstoff gefertigt ist. Der keramische Faserverbundwerkstoff kann beispielsweise ein homogenes Fasergewebe des Typs NEXTEL 610-1500 Denier (Handelsname der Firma 3M Deutschland GmbH, Neuss, Deutschland) umfassen. Das Fasergewebe umfasst beispielsweise 10 bis 15 Lagen.

Die oxidkeramische Matrix des keramischen Faserverbundwerkstoffs kann beispielsweise eine Mischung aus 85% Aluminiumoxid und 15% Zirkondioxid sein, wie sie beispielsweise unter der Bezeichnung WPS FW12 von der Firma Walter E.C. Pritzkow Spezialkeramik (70794 Filderstadt-Sielmingen, Deutschland) kommerziell angeboten wird. Die Stärke der Armierungsschicht 4 in radialer Richtung beträgt beispielsweise 2,5 mm.

Die Armierungsschicht 4 überdeckt sowohl die Hülse 3 als auch Abschnitte der äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements 1 und des zweiten Rohrelements 2 in Umfangsrichtung jeweils vollständig und in axialer Richtung teilweise.

Zur Herstellung der Armierungsschicht 4 werden mehrere mit Schlicker getränkte Gewebelagen in 0/90°-Anordnung um die Hülse 3, um die äußere Mantelfläche des ersten Rohrelements 1 und um die äußere Mantelfläche des zweiten Rohrelements 2 gewickelt. Anschließend wird die Armierung in einem Trockenofen getrocknet, beispielsweise bei einer Temperatur von 80°C über eine Zeitdauer von 12 Stunden. Zur Fertigstellung der Rohrverbin-

dung wird das Bauteil nach dem Aufbringen und Trocknen des keramischen Faserverbundwerkstoffs als Armierungsschicht 4 in einem Ofen gebrannt, beispielsweise bei einer Temperatur von 1200°C. Während des Brennvorgangs reduziert sich der Durchmesser der Armierungsschicht 4, sodass die Hülse 3 fest gegen die äußere Mantelfläche des zweiten Rohrelements 2 gepresst wird. Es hat sich herausgestellt, dass diese Anpresskraft ausreicht, eine gasdichte Verbindung zwischen dem metallischen ersten Rohrelement 1 und dem keramischen zweiten Rohrelement 2 herzustellen. Fig. 7 und Fig. 8 zeigen im Detail zwei Ausführungsformen für die Abdichtung der Fuge zwischen dem Rohrelement 2 und der Hülse 3. Fig. 7 zeigt eine Detailansicht der Fuge zwischen dem Rohrelement 2 und der aufgeschrumpften Hülse 3. Die Dichtwirkung wird erreicht sowohl durch die Kombination aus hermetischem Kontakt zwischen der Außenfläche des Rohrelementes 2 und der Innenfläche der Hülse 3 als auch durch einen Labyrintheffekt, der durch die Verringerung der Spaltweite im Spalt 13 beim Aufschrumpfen der Hülse 3 auf das Rohrelement 2 erzielt wird. Der Vorteil dieser Ausführungsform ist, dass sie keine Hilfsstoffe erfordert. Fig. 8 zeigt eine Detailansicht der Fuge bei stoffschlüssiger Verbindung zwischen dem Rohrelement 2 und der Hülse 3. Der Kleber, die Füllmasse oder das Lot füllt dabei den Spalt 14 zwischen der Außenfläche des Rohrelementes 2 und der Innenfläche der Hülse 3 aus und dichtet auf diese Weise die Fuge ab. Der Vorteil dieser Ausführungsform ist, dass sie eine gröbere Passung zwischen dem Rohrelement 2 und der Hülse 3 toleriert, wodurch die Montage erleichtert und die Fertigungskosten reduziert werden können.

Fig. 2 zeigt schematisch einen Längsschnitt durch eine Rohrverbindung gemäß einer zweiten erfindungsgemäßen Ausführungsform. Die Rohrverbindung ist rotationssymmetrisch aufgebaut, die gestrichelte Linie in Fig. 2 bezeichnet die Symmetrieachse. Ein erstes Rohrelement 1 und ein zweites Rohrelement 2 sind an ihren Stirnseiten über eine Hülse aus einem metallischen Werkstoff 3 miteinander verbunden.

Das erste Rohrelement 1 ist aus einem metallischen Werkstoff gefertigt, beispielsweise aus Alloy 800 H (Werkstoffnummer 1.4876 gemäß DIN EN 10027-2). Sein Innendurchmesser beträgt beispielsweise 42 mm, sein Außendurchmesser 50 mm.

Das erste Rohrelement 1 weist eine Aufweitung 5 auf, bei der sich in Richtung des stirnseitigen Endes der Innendurchmesser des ersten Rohrelements 1 vergrößert. Der Übergang vom kleinsten Innendurchmesser des ersten Rohrelements 1 vor der Aufweitung 5 bis zum größten Innendurchmesser am Ende der Aufweitung 5 erfolgt in diesem Beispiel linear. Der sich daraus ergebende Konus der Aufweitung 5 hat beispielsweise eine Länge in axialer Richtung von 30 mm, der halbe Öffnungswinkel des Konus beträgt 7,5°.

Die Hülse 3 bildet den stirnseitigen Endabschnitt des ersten Rohrelements 1 und ist somit integral und in Umfangsrichtung vollständig mit diesem verbunden. Die Wandstärke der Hülse 3 kann beispielsweise 0,25 mm bis 0,3 mm betragen. Der Außendurchmesser des ersten Rohrelements 1 ist über seine gesamte Länge konstant. Die Hülse 3 und die Aufweitung 5 können beispielsweise dadurch hergestellt sein, dass ein Fräswerkzeug oder ein Drehwerkzeug an das stirnseitige Ende des ursprünglichen ersten Rohrelements herangeführt wird und durch spanenden Materialabtrag den vergrößerten Innenquerschnitt der Hülse 3 sowie den Konus der Aufweitung 5 erzeugt.

Das erste Rohrelement 1 weist in einem Bereich, der zur Überdeckung mit der Armierungsschicht 4 vorgesehen ist, einen Abschnitt mit vergrößertem Außendurchmesser in Form einer Ausbuchtung 6 auf. Im Längsschnitt hat die Ausbuchtung 6 eine Sinusform, wobei die Übergänge von der nicht vergrößerten äußeren Mantelfläche zur Ausbuchtung 6 jeweils am Minimum der Sinusform ansetzen. Die sinusförmige Ausbuchtung 6 hat beispielsweise eine Amplitude von 5 mm, gemessen ab der nicht vergrößerten äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements 1. Die sinusförmige Ausbuchtung 6 hat eine Wellenlänge von 40 mm, was dem Abstand zwischen den zwei Übergangspunkten zu der nicht vergrößerten äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements 1 entspricht. In dem dargestellten Beispiel ist die Form der Ausbuchtung 6 in Längsrichtung symmetrisch. Die Ausbuchtung 6 ist in Umfangsrichtung umlaufend ohne Unterbrechung gestaltet.

Das zweite Rohrelement 2 ist aus einem keramischen Werkstoff gefertigt, beispielsweise aus Alsint 99,7. Sein Innendurchmesser beträgt beispielsweise 42 mm, sein Außendurchmesser 50 mm. Das Ende des zweiten Rohrelements 2 kann auf einer Länge von beispielsweise 20 mm bis 50 mm mit einem Durchmesser von 49 mm und einer Passung f7, h7 oder h8 ausgeführt werden. Im Bereich der Passung kann die Außenwand des zweiten Rohrelements einen Mittenrauwert Ra gemäß DIN EN ISO 4287 kleiner als 1,6 µm aufweisen.

Die Wandstärke der Hülse 3 kann beispielsweise 0,25 mm bis 0,3 mm betragen. Die Länge der Hülse kann beispielsweise 30 mm bis 50 mm betragen. Zur Befestigung der Hülse 3 auf der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements 2 kann der Innendurchmesser der Hülse 3 ohne Spiel auf den Außendurchmesser der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements 2 abgestimmt sein, sodass die Hülse 3 passgenau auf die Stirnseite des zweiten Rohrelements 2 aufgeschoben werden kann. Der Innendurchmesser der Hülse 3 kann beispielsweise 49 mm betragen. Der Innendurchmesser der Hülse 3 kann beispielsweise mit einer H7-Passung oder einer H8-Passung ausgeführt sein. Im Bereich der Passung kann die Innenwand der Hülse 3 einen Mittenrauwert Ra gemäß DIN EN ISO 4287 kleiner als 1,6 µm aufweisen.

In einer alternativen Variante der Befestigung wird die Hülse 3 erhitzt, sodass sie sich ausdehnt, und anschließend im erhitzten Zustand auf die Stirnseite des zweiten Rohrelements 2 aufgeschoben. Optional kann vor der Montage der Hülse 3 auf der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements 2 ein Lot in Form einer Folie oder Paste aufgetragen sein. Nach der Abkühlung der Hülse 3 verringert sich deren Innendurchmesser, so dass sie auf der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements 2 aufgeschrumpft ist. Die Hülse 3 umspannt das zweite Rohrelement 2 somit in Umfangsrichtung vollständig und in Längsrichtung teilweise.

Auf der äußeren Mantelfläche der Hülse 3 ist eine Armierungsschicht 4 angeordnet, die aus einem keramischen Faserverbundwerkstoff gefertigt ist. Der keramische Faserverbundwerkstoff kann beispielsweise ein homogenes Fasergewebe des Typs NEXTEL DF13-4500 (Handelsname der Firma 3M Deutschland GmbH, Neuss, Deutschland) umfassen. Das Fasergewebe umfasst beispielsweise 10 bis 15 Lagen.

Die oxidkeramische Matrix des keramischen Faserverbundwerkstoffs kann beispielsweise eine Mischung aus 85% Aluminiumoxid und 15% Zirkondioxid sein, wie sie beispielsweise unter der Bezeichnung WPS FW12 von der Firma Walter E.C. Pritzkow Spezialkeramik (70794 Filderstadt-Sielmingen, Deutschland) kommerziell angeboten wird. Die Stärke der Armierungsschicht 4 in radialer Richtung beträgt beispielsweise 2,5 mm.

Die Armierungsschicht 4 überdeckt sowohl die Hülse 3 als auch Abschnitte der äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements 1 inklusive der Ausbuchtung 6 und des zweiten Rohrelements 2 in Umfangsrichtung jeweils vollständig und in axialer Richtung teilweise.

Zur Herstellung der Armierungsschicht 4 werden mehrere mit Schlicker getränkte Gewebelagen in 0/90°-Anordnung um die Hülse 3, um die äußere Mantelfläche des ersten Rohrelements 1 und um die äußere Mantelfläche des zweiten Rohrelements 2 gewickelt. Im Bereich der Ausbuchtung 6 kann die Armierungsschicht 4 in Längsrichtung geschlitzt sein, beispielsweise durch drei, vier, fünf oder sechs gleichmäßig oder ungleichmäßig über den Umfang verteilte Schlitzte. In einer solchen geschlitzten Ausführung umfasst an dieser Stelle die Armierungsschicht 4 somit mehrere in Längsrichtung der Rohrverbindung verlaufende Einzelschichten. Durch die formschlüssige Verbindung zwischen der OCMC-Armierung und dem Rohrelement 1 können axiale Kräfte großflächig übertragen werden. Gleichzeitig ist die Verbindung nachgiebig in radialer Richtung, so dass Unterschiede in der thermischen Ausdehnung zwischen dem Rohrelement 1 und der OCMC-Armierung spannungsfrei ausgeglichen werden können.

Nach dem Aufbringen der Armierungsschicht 4 wird das Bauteil in einem Trockenofen getrocknet, beispielsweise bei einer Temperatur von 80°C über eine Zeitdauer von 12 Stunden. Zur Fertigstellung der Rohrverbindung wird das Bauteil nach dem Aufbringen und Trocknen des keramischen Faserverbundwerkstoffs als Armierungsschicht 4 in einem Ofen gebrannt, beispielsweise bei einer Temperatur von 1200°C. Während des Brennvorgangs reduziert sich der Durchmesser der Armierungsschicht 4, sodass die Hülse 3 fest gegen die äußere Mantelfläche des zweiten Rohrelements 2 gepresst wird. Es hat sich herausgestellt, dass diese Anpresskraft ausreicht, eine gasdichte Verbindung zwischen dem metallischen ersten Rohrelement 1 und dem keramischen zweiten Rohrelement 2 herzustellen.

Zusätzlich zu der kraftschlüssigen Verbindung aufgrund des Schrumpfungsprozesses der Armierungsschicht 4 bewirkt die Überdeckung der Ausbuchtung 6 mit ihrer veränderten Außenkontur einen Formschluss zwischen dem ersten Rohrelement 1 und der Armierungsschicht 4, was sich vorteilhaft auf die Dauerbeständigkeit der Rohrverbindung auswirkt und ein Auseinanderrutschen der Bauteile in axialer Richtung zuverlässig verhindert.

Fig. 3 zeigt schematisch in einer Detailansicht einen Längsschnitt durch einen Abschnitt eines ersten Rohrelements 1, das einen Bereich mit vergrößertem Außendurchmesser in Form einer Ausbuchtung 6 aufweist. Die in Fig. 3 dargestellte Ausbuchtung 6 unterscheidet sich von der in Fig. 2 dargestellten unter anderem darin, dass sie in Längsrichtung unsymmetrisch ist und ihre Form in Längsrichtung einem nicht gleichseitigen Dreieck ähnelt.

Die Differenz zwischen dem nicht vergrößerten Außendurchmesser des ersten Rohrelements 1 und dem größten Durchmesser der Ausbuchtung 6 ist in Fig. 3 mit „dh“ bezeichnet. Sie kann beispielsweise von 3 mm bis 20 mm betragen.

Da die Form der Ausbuchtung 6 in Längsrichtung unsymmetrisch ist, weist sie eine kürzere Flanke (in Fig. 3 rechts vom größten Durchmesser der Ausbuchtung) und eine längere Flanke (in Fig. 3 links vom größten Durchmesser der Ausbuchtung) auf. Die Übergänge von der nicht vergrößerten äußeren Mantelfläche zur Ausbuchtung 6 sind abgerundet, wobei die Radien der Abrundung von 1 mm bis 3 mm betragen.

Der Steigungswinkel der kürzeren Flanke des Übergangs von dem nicht vergrößerten Außendurchmesser des ersten Rohrelements 1 bis zum größten Außendurchmesser der Ausbuchtung 6 ist in Fig. 3 mit φ bezeichnet. Er lässt sich beispielsweise berechnen aus der Durchmesserdiffferenz dh und der axialen Länge der kürzeren Flanke, in Fig. 3 als „dl“ bezeichnet, als $\varphi = \arctan(dh / dl)$. Der Steigungswinkel φ beträgt beispielsweise 18°.

Fig. 4 zeigt schematisch einen Längsschnitt durch eine Rohrverbindung gemäß einer dritten erfindungsgemäßen Ausführungsform. Die Rohrverbindung ist rotationssymmetrisch aufgebaut, die gestrichelte Linie in Fig. 4 bezeichnet die Symmetrieachse. Ein erstes Rohrelement 1 und ein zweites Rohrelement 2 sind an ihren Stirnseiten über eine Hülse aus einem metallischen Werkstoff 3 miteinander verbunden.

Das erste Rohrelement 1 ist aus einem metallischen Werkstoff gefertigt, beispielsweise aus Centralloy® G 4852 Micro (Handelsname der Firma Schmidt + Clemens GmbH + Co. KG, Lindlar, Deutschland). Sein Innendurchmesser beträgt beispielsweise 42 mm, sein Außendurchmesser 50 mm.

Das erste Rohrelement 1 weist eine Aufweitung 5 auf, bei der sich in Richtung des stirnseitigen Endes der Innendurchmesser des ersten Rohrelements 1 vergrößert. Der Übergang vom kleinsten Innendurchmesser des ersten Rohrelements 1 vor der Aufweitung 5 bis zum größten Innendurchmesser am Ende der Aufweitung 5 erfolgt in diesem Beispiel linear. Der sich daraus ergebende Konus der Aufweitung 5 hat beispielsweise eine Länge in axialer Richtung von 30 mm, der halbe Öffnungswinkel des Konus beträgt $7,5^\circ$.

Die Hülse 3 überdeckt in Längsrichtung etwa zur Hälfte den Bereich der Aufweitung 5. Der Werkstoff der Hülse 3 ist beispielsweise Alloy 800 H (Werkstoffnummer 1.4876 gemäß DIN EN 10027-2).

Die Wandstärke der Hülse 3 kann beispielsweise 0,25 mm bis 0,3 mm betragen. Die Hülse 3 kann beispielsweise vorgefertigt werden, indem ein dickwandiges Rohr oder ein zylindrischer Stab geeignet abgedreht werden. Die Länge der Hülse 3 kann beispielsweise 30 mm bis 50 mm betragen. Der Innendurchmesser der Hülse kann beispielsweise 49 mm betragen. Der Innendurchmesser der Hülse kann beispielsweise mit einer H7-Passung oder einer H8-Passung ausgeführt sein. Im Bereich der Passung kann die Innenwand der Hülse 3 einen Mittenrauwert R_a gemäß DIN EN ISO 4287 kleiner als $1,6 \mu\text{m}$ aufweisen.

Die Hülse 3 ist in Umfangsrichtung vollständig mit dem ersten Rohrelement 1 verbunden. In dem dargestellten Beispiel ist die Hülse 3 stoffschlüssig durch eine umlaufende Schweißnaht 8 mit der äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements 1 verbunden.

Das zweite Rohrelement 2 ist aus einem keramischen Werkstoff gefertigt, beispielsweise aus Alsing 99,7. Sein Innendurchmesser beträgt beispielsweise 42 mm, sein Außendurch-

messer 50 mm. In diesem Beispiel weist die äußere Mantelfläche des zweiten Rohrelements 2 in dem Bereich, der von der Hülse 3 überdeckt ist, einen verringerten Außendurchmesser auf. Das Ende des zweiten Rohrelements 2 kann auf einer Länge von beispielsweise 20 mm bis 50 mm mit einem Durchmesser von 49 mm und einer Passung f7, h7 oder h8 ausgeführt werden. Im Bereich der Passung kann die Außenwand des zweiten Rohrelements einen Mittenrauwert Ra gemäß DIN EN ISO 4287 kleiner als 1,6 µm aufweisen.

Zur Befestigung der Hülse 3 auf der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements 2 kann der Innendurchmesser der Hülse 3 ohne Spiel auf den Außendurchmesser der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements 2 abgestimmt sein, sodass die Hülse 3 passgenau auf die Stirnseite des zweiten Rohrelements 2 aufgeschoben werden kann. In einer alternativen Variante der Befestigung wird die Hülse 3 erhitzt, sodass sie sich ausdehnt, und anschließend im erhitzten Zustand auf die Stirnseite des zweiten Rohrelements 2 aufgeschoben. Nach der Abkühlung der Hülse 3 verringert sich deren Innendurchmesser, so dass sie auf der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements 2 aufgeschrumpft ist. Die Hülse 3 umspannt das zweite Rohrelement 2 somit in Umfangsrichtung vollständig und in Längsrichtung teilweise.

Optional kann vor der Montage der Hülse 3 die äußere Mantelfläche des zweiten Rohrelements 2, die von der Hülse 3 überdeckt werden soll, mit einer Glaslotpaste, beispielsweise G018-346 (Handelsname der Schott AG, Deutschland) beschichtet werden. Weiterhin optional kann ein Draht aus einem Lot ringförmig in eine Nut in der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements 2 eingesetzt werden. Der Werkstoff des so gebildeten Löttrings 7 kann beispielsweise Palnir®-4 (Handelsname der Firma Morgan Advanced Materials plc, United Kingdom) sein.

Auf der äußeren Mantelfläche der Hülse 3 ist eine Armierungsschicht 4 angeordnet, die aus einem keramischen Faserverbundwerkstoff gefertigt ist. Der keramische Faserverbundwerkstoff umfasst in diesem Beispiel ein Hybridfasergewebe, das aus keramischen Fasern und metallischen Fasern hergestellt ist. Das Webmuster ist beispielsweise Köper 4/4. Für die Kettfäden des Gewebes kann beispielsweise ein Garn vom Typ NEXTEL 610-1500 Denier verwendet werden. Als Schussfäden können beispielsweise keramische Garne vom Typ NEXTEL 610-1500 Denier und metallische Litzen aus einer FeCrAl-Legierung mit beispielsweise fünf Adern mit jeweils 100 µm Durchmesser verwendet werden. Das Gewebe kann beispielsweise überwiegend keramische Fasern umfassen. In einem beispielsweise 100 mm langen Randabschnitt der Gewebbahn werden abwechselnd keramische Garne und metallische Litzen als Schussfäden verwendet.

Der Anteil der metallischen Fasern 10 an dem am ersten Rohrelement 1 anliegenden Ende der Armierungsschicht 4 ist größer als der Anteil der keramischen Fasern. In dem Teil der Armierungsschicht 4, die am zweiten Rohrelement 2 anliegt, ist der Anteil der keramischen Fasern größer als der Anteil der metallischen Fasern. Die Abfolge der Schussfäden im Randbereich der Gewebbahn und in Richtung des am ersten Rohrelement 1 anliegenden Endes kann beispielsweise wie folgt sein: 10K-1M-6K-1M-4K-1M-3(3K-1M)-4(2K-1M)-8(1K-1M)-4(1K-2M)-3(1K-3M)-1K-4M-1K-6M-1K-10M-1K-10M. Dabei bezeichnen iK die Anzahl i der aufeinander folgenden keramischen Schussfäden, jM die Anzahl j der aufeinander folgenden metallischen Schussfäden und n in der Angabe n(iK-jM) die Anzahl der Wiederholungen des Musters (iK-jM).

Die keramische Matrix des keramischen Faserverbundwerkstoffs kann beispielsweise eine Mischung aus 85% Aluminiumoxid und 15% Zirkondioxid sein, wie sie beispielsweise unter der Bezeichnung WPS FW12 von der Firma Walter E.C. Pritzkow Spezialkeramik (70794 Filderstadt-Sielmingen, Deutschland) kommerziell angeboten wird. Die Stärke der Armierungsschicht 4 in radialer Richtung beträgt beispielsweise 2,5 mm.

Die Armierungsschicht 4 überdeckt sowohl die Hülse 3 als auch Abschnitte der äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements 1 und des zweiten Rohrelements 2 in Umfangsrichtung jeweils vollständig und in axialer Richtung teilweise.

Zur Fertigstellung der Rohrverbindung wird zunächst die Armierung in einem Trockenofen getrocknet, beispielsweise bei einer Temperatur von 80°C über eine Zeitdauer von 12 Stunden. Anschließend wird das Bauteil nach dem Aufbringen und Trocknen des keramischen Faserverbundwerkstoffs als Armierungsschicht 4 in einem Ofen gebrannt, beispielsweise bei einer Temperatur von 1200°C. Während des Brennvorgangs reduziert sich der Durchmesser der Armierungsschicht 4, sodass die Hülse 3 fest gegen die äußere Mantelfläche des zweiten Rohrelements 2 gepresst wird. Es hat sich herausgestellt, dass diese Anpresskraft ausreicht, eine gasdichte Verbindung zwischen dem metallischen ersten Rohrelement 1 und dem keramischen zweiten Rohrelement 2 herzustellen.

Zur Steigerung der mechanischen Stabilität sind die Metallfasern 10 am Ende der Armierungsschicht 4 über eine Schweißnaht 9 stoffschlüssig mit der äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements 1 verbunden.

Fig. 5 zeigt eine Variante der Ausführungsform gemäß Fig. 1, wobei die Wandstärke der Hülse in Längsrichtung abgesetzt ist. Im ersten Abschnitt 3 hat die Hülse eine Wandstärke von 0,3mm. Im zweiten Abschnitt 11 beträgt die Wandstärke der Hülse 0,7 mm. Der erste Abschnitt

der Hülse 3 wird über das zweite Rohrelement gestülpt. Der zweite Abschnitt 11 ist ungestützt. Die Wandstärke in diesem Abschnitt ist so bemessen, dass die Hülse durch die Armierung 4 plastisch verformt wird. Dadurch entsteht eine feste kraft- und formschlüssige Verbindung zwischen der Armierung 4 und dem Abschnitt der Hülse 11. Auf diese Weise werden axiale Kräfte wirksam vom dickwandigen Rohrelement 1 auf die Armierung übertragen, während die dünnwandige Hülse dabei entlastet wird. Die Hülse mit abgesetzter Wandstärke kann auch auf die erfindungsgemäßen Ausführungsformen angewandt werden, die in Fig. 2 und Fig. 4 offenbart sind.

Fig. 6 zeigt eine Variante der Ausführungsform gemäß Fig. 5, wobei die Randzone der Armierung 12 in axialer Richtung geschlitzt ist. Über dem Umfang sind, gleichmäßig verteilt, beispielsweise 2 bis 6 Schlitz angebracht. Die Schlitz haben beispielsweise eine Länge im Bereich von 20 mm bis 200 mm. Die Schlitz reichen vom stirnseitigen Ende in Richtung des Rohrelementes 1 über den aufgeweiteten Bereich 5 des Rohrelementes 1 bis zum Beginn des Abschnitts 11. Der Vorzug der Schlitz ist, dass sie der Armierung Flexibilität in Umfangsrichtung verleihen. Auf diese Weise kann in diesem Bereich, in dem das Rohrelement 1 eine hohe Steifigkeit besitzt, die Differenz in der thermischen Ausdehnung zwischen dem Rohrelement 1 und der Armierung spannungsfrei ausgeglichen werden. Dabei bleibt der Kraftschluss erhalten, um axiale Kräfte vom dickwandigen Abschnitt des Rohrelementes 1 auf die Armierung zu übertragen. Die Schlitz in der Randzone der Armierung können auch auf die erfindungsgemäßen Ausführungsformen angewandt werden, die in Fig. 2 und Fig. 4 offenbart sind.

Bezugszeichenliste

- 1 ... erstes Rohrelement
- 2 ... zweites Rohrelement
- 3 ... Hülse aus einem metallischen Werkstoff
- 4 ... Armierungsschicht
- 5 ... Aufweitung
- 6 ... Ausbuchtung
- 7 ... Löttring
- 8 ... Schweißnaht
- 9 ... Schweißnaht
- 10 ... Metallfasern
- 11 ... abgesetzter Abschnitt der Hülse
- 12 ... geschlitzte Randzone der Armierung
- 13 ... Spalt bei aufgeschrumpfter Hülse-Rohr-Verbindung

14 ... Spalt bei stoffschlüssiger Hülse-Rohr-Verbindung

Patentansprüche

1. Rohrverbindung zur stirnseitigen Verbindung von Rohrelementen umfassend ein erstes Rohrelement (1) aus einem metallischen Werkstoff, ein zweites Rohrelement (2) aus einem keramischen Werkstoff, eine Hülse aus einem metallischen Werkstoff (3), die mit dem ersten Rohrelement (1) in Umfangsrichtung vollständig verbunden ist und die äußere Mantelfläche des zweiten Rohrelements (2) in Umfangsrichtung vollständig und in Längsrichtung zumindest teilweise umspannt, sowie eine auf der äußeren Mantelfläche der Hülse (3) angeordnete Armierungsschicht (4), dadurch gekennzeichnet, dass die Armierungsschicht (4) aus einem keramischen Faserverbundwerkstoff gefertigt und sowohl mit der äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements (1) als auch mit der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements (2) verbunden ist.
2. Rohrverbindung gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Rohrelement (1) eine Aufweitung (5) aufweist, bei der sich in Richtung des stirnseitigen Endes der Innendurchmesser des ersten Rohrelements (1) vergrößert, wobei die äußere Mantelfläche des ersten Rohrelements (1) im Bereich der Aufweitung (5) zumindest teilweise von der Armierungsschicht (4) überdeckt ist.
3. Rohrverbindung gemäß Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass das erste Rohrelement (1) in einem von der Armierungsschicht (4) überdeckten Bereich einen Abschnitt mit verringertem und/oder vergrößertem Außendurchmesser aufweist.
4. Rohrverbindung gemäß Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Abschnitt eine Einkerbung und/oder eine Ausbuchtung (6) aufweist, wobei die Differenz zwischen dem nicht verringerten Außendurchmesser des ersten Rohrelements (1) und dem geringsten Durchmesser der Einkerbung von 0,25 mm bis 10 mm beträgt, und/oder die Differenz zwischen dem größten Durchmesser der Ausbuchtung (6) und dem nicht vergrößerten Außendurchmesser des ersten Rohrelements (1) von 0,25 mm bis 50 mm beträgt.
5. Rohrverbindung gemäß Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, dass der Steigungswinkel der in Längsrichtung des ersten Rohrelements (1) kürzeren Flanke des Übergangs von dem nicht verringerten und/oder vergrößerten Außendurchmesser des ersten Rohrelements (1) bis zum geringsten Außendurchmesser oder zum größten Außendurchmesser in dem Abschnitt von 5° bis 60° beträgt.

6. Rohrverbindung gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Hülse (3) stirnseitig mit dem ersten Rohrelement (1) verbunden ist, bevorzugt den stirnseitigen Endabschnitt des ersten Rohrelements (1) bildet.
7. Rohrverbindung gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zwischen der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements (2) und der Innenfläche der Hülse (3) eine in Umfangsrichtung umlaufende Dichtung angebracht ist.
8. Rohrverbindung gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der keramische Faserverbundwerkstoff der Armierungsschicht (4) metallische Fasern umfasst, die zumindest teilweise an der Oberfläche der Armierungsschicht (4) zugänglich sind und stoffschlüssig mit der äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements (1) verbunden, vorzugsweise verschweißt, sind.
9. Verfahren zur Herstellung einer stirnseitigen Verbindung von Rohrelementen umfassend die Schritte:
 - (a) Bereitstellen eines ersten Rohrelements (1) aus einem metallischen Werkstoff, eines zweiten Rohrelements (2) aus einem keramischen Werkstoff und einer Hülse (3) aus einem metallischen Werkstoff,
 - (b) in Umfangsrichtung vollständiges Verbinden der Hülse (3) mit dem ersten Rohrelement (1),
 - (c) Befestigen der Hülse (3) auf der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements (2), sodass die Hülse (3) die äußere Mantelfläche des zweiten Rohrelements (2) in Umfangsrichtung vollständig und in Längsrichtung zumindest teilweise umspannt,
 - (d) Anbringen einer Armierungsschicht (4) aus einem keramischen Faserverbundwerkstoff auf der äußeren Mantelfläche der Hülse (3), und
 - (e) Verbinden der Armierungsschicht (4) mit der äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements (1) und mit der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements (2).
10. Verfahren zur Herstellung einer stirnseitigen Verbindung von Rohrelementen umfassend die Schritte:
 - (a) Bereitstellen eines ersten Rohrelements (1) aus einem metallischen Werkstoff und eines zweiten Rohrelements (2) aus einem keramischen Werkstoff,
 - (b) Herstellen einer Hülse (3) aus einem metallischen Werkstoff um die Enden des ersten Rohrelements (1) und des zweiten Rohrelements (2),

- (c) in Umfangsrichtung vollständiges Verbinden der Hülse (3) mit dem ersten Rohrelement (1),
- (d) Befestigen der Hülse (3) auf der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements (2), sodass die Hülse (3) die äußere Mantelfläche des zweiten Rohrelements (2) in Umfangsrichtung vollständig und in Längsrichtung zumindest teilweise umspannt,
- (e) Anbringen einer Armierungsschicht (4) aus einem keramischen Faserverbundwerkstoff auf der äußeren Mantelfläche der Hülse (3), und
- (f) Verbinden der Armierungsschicht (4) mit der äußeren Mantelfläche des ersten Rohrelements (1) und mit der äußeren Mantelfläche des zweiten Rohrelements (2).

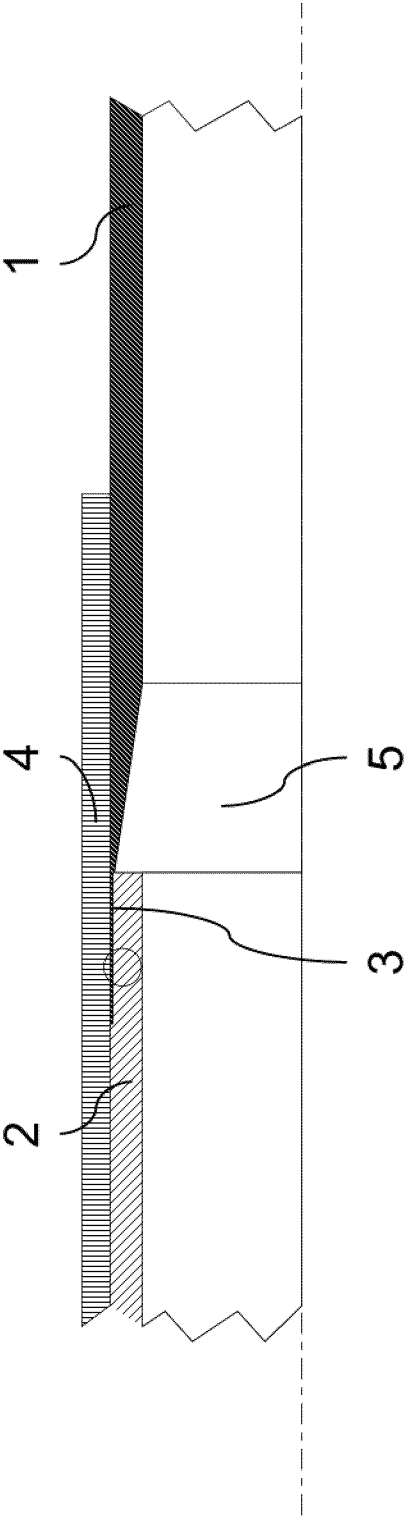


Fig. 1

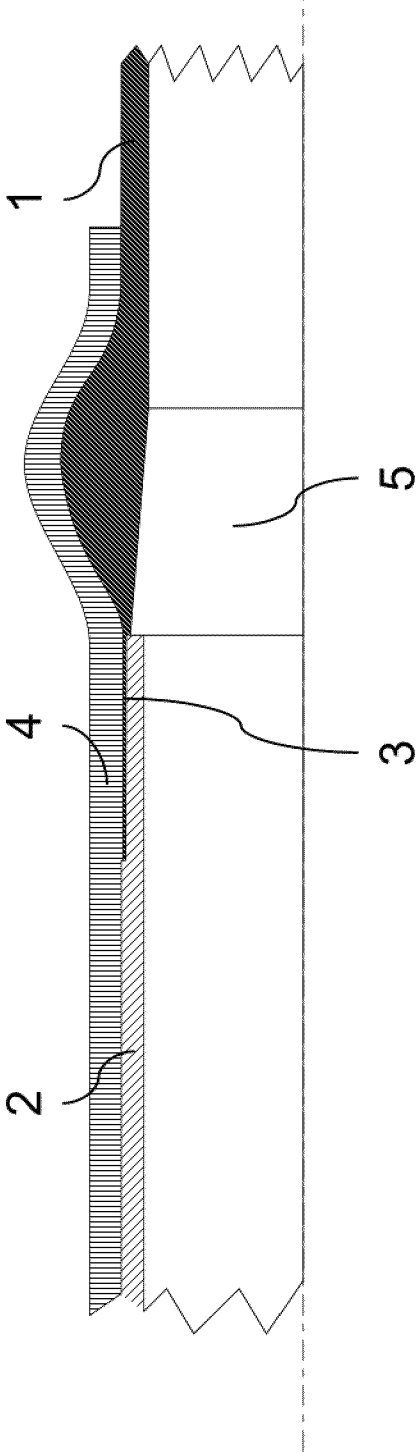


Fig. 2

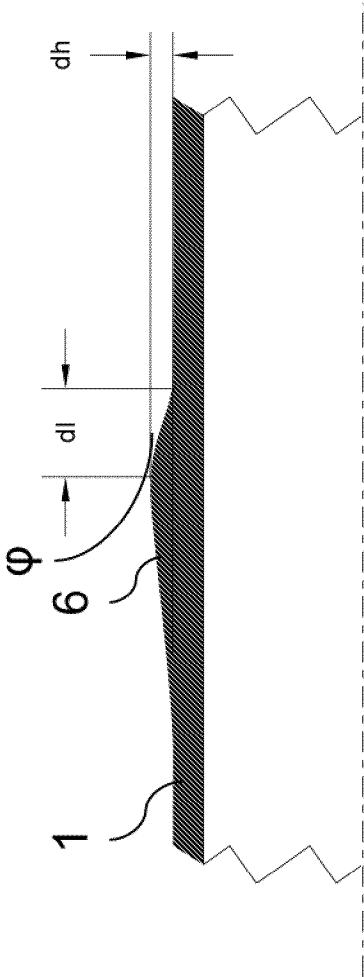


Fig. 3

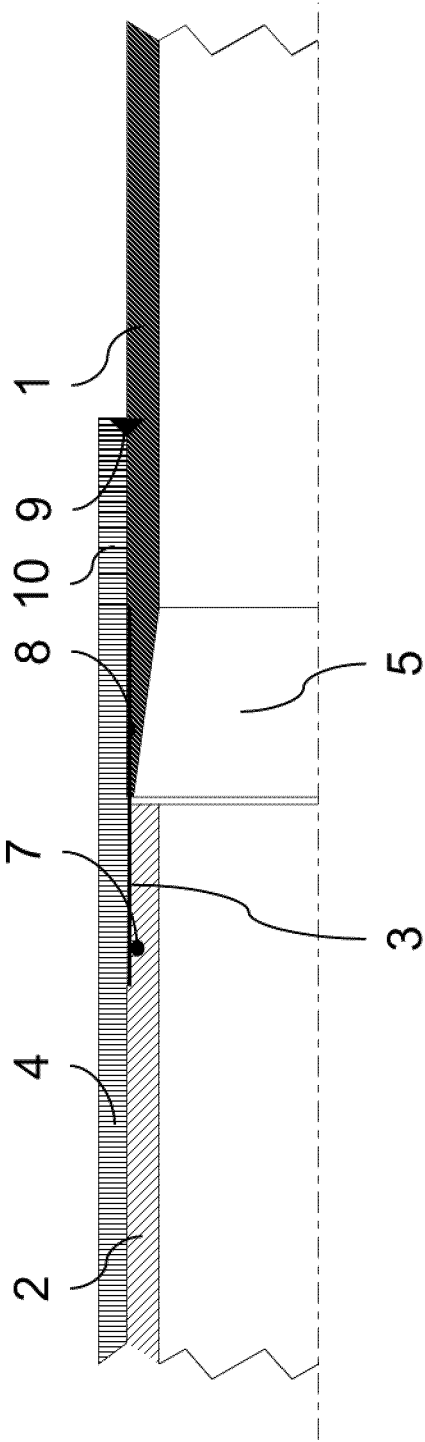


Fig. 4

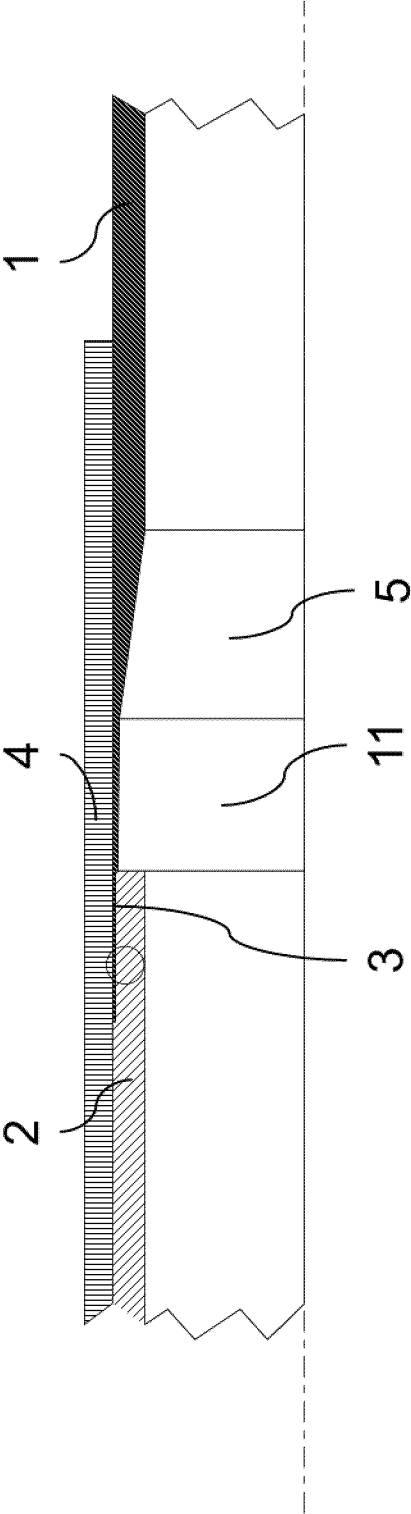


Fig. 5

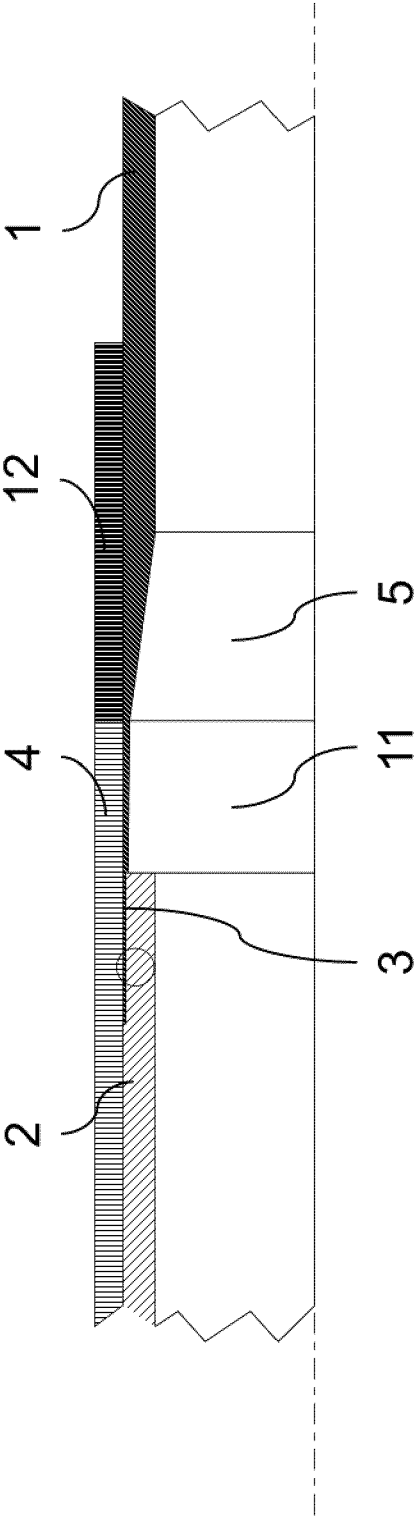


Fig. 6

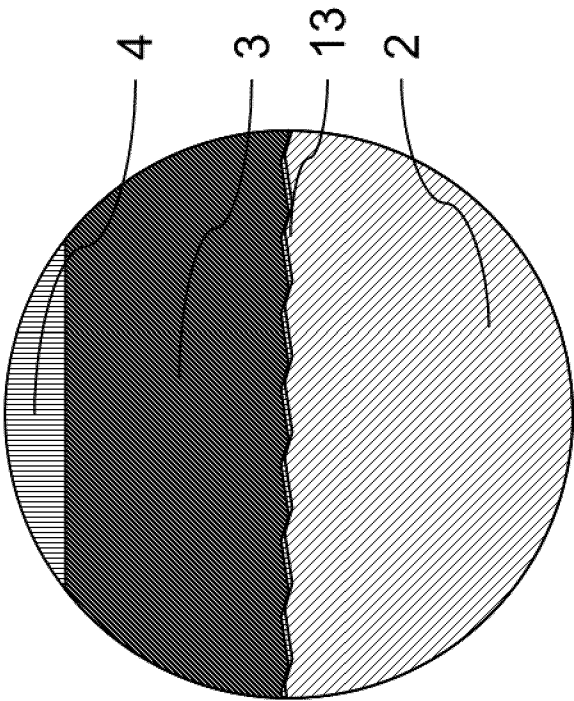


Fig. 7

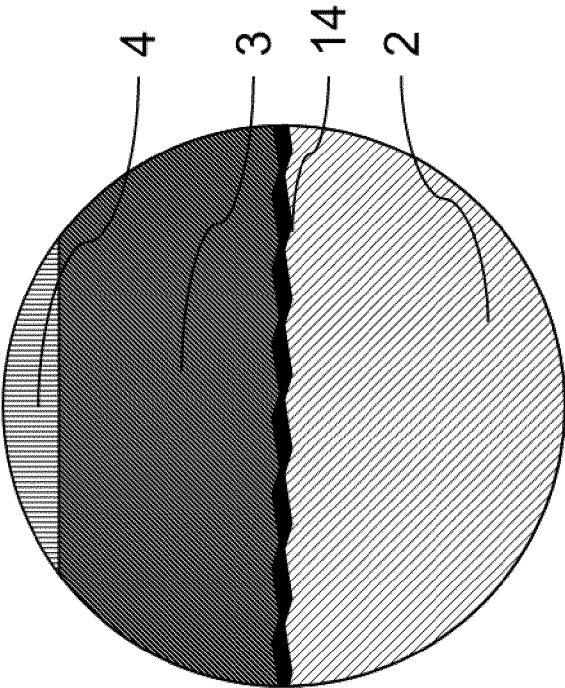


Fig. 8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2024/084471

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**F16L 13/007**(2006.01)i; **F16L 49/02**(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

F16L

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	WO 2016184776 A1 (BASF SE [DE]) 24 November 2016 (2016-11-24)	1,2,6-10
A	cited in the application the whole document	3-5
A	DE 10235485 A1 (LINDE AG [DE]) 12 February 2004 (2004-02-12) paragraph [0007] - paragraph [0013] Figure	1-10
A	DE 102004012980 A1 (INST FRANCAIS DU PETROLE [FR]) 30 September 2004 (2004-09-30) paragraph [0029] - paragraph [0032] figure 1	1-10



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

30 January 2025

Date of mailing of the international search report

10 February 2025

Name and mailing address of the ISA/EP

European Patent Office
p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk
Netherlands (Kingdom of the)

Telephone No. (+31-70)340-2040

Facsimile No. (+31-70)340-3016

Authorized officer

Vecchio, Giovanni

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2024/084471

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
WO	2016184776	A1	24 November 2016	CN	107683384	A	09 February 2018
				DK	3297971	T3	30 May 2022
				EP	3297971	A1	28 March 2018
				ES	2910667	T3	13 May 2022
				JP	6886926	B2	16 June 2021
				JP	2018525574	A	06 September 2018
				KR	20180009764	A	29 January 2018
				RU	2017144278	A	20 June 2019
				US	2018134629	A1	17 May 2018
				WO	2016184776	A1	24 November 2016
DE	10235485	A1	12 February 2004	NONE			
DE	102004012980	A1	30 September 2004	CA	2460622	A1	20 September 2004
				DE	102004012980	A1	30 September 2004
				FR	2852654	A1	24 September 2004
				NL	1025726	C2	09 November 2004
				US	2004262912	A1	30 December 2004

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. F16L13/007 F16L49/02
ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RESEARCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
F16L

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)
EPO-Internal

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	WO 2016/184776 A1 (BASF SE [DE]) 24. November 2016 (2016-11-24) in der Anmeldung erwähnt	1,2,6-10
A	das ganze Dokument	3-5
A	----- DE 102 35 485 A1 (LINDE AG [DE]) 12. Februar 2004 (2004-02-12) Absatz [0007] - Absatz [0013] Abbildung	1-10
A	----- DE 10 2004 012980 A1 (INST FRANCAIS DU PETROLE [FR]) 30. September 2004 (2004-09-30) Absatz [0029] - Absatz [0032] Abbildung 1	1-10

☐ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☒ Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :
"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche 30. Januar 2025	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts 10/02/2025
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Bevollmächtigter Bediensteter Vecchio, Giovanni

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2024/084471

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 2016184776 A1	24-11-2016	CN 107683384 A	09-02-2018
		DK 3297971 T3	30-05-2022
		EP 3297971 A1	28-03-2018
		ES 2910667 T3	13-05-2022
		JP 6886926 B2	16-06-2021
		JP 2018525574 A	06-09-2018
		KR 20180009764 A	29-01-2018
		RU 2017144278 A	20-06-2019
		US 2018134629 A1	17-05-2018
		WO 2016184776 A1	24-11-2016
DE 10235485 A1	12-02-2004	KEINE	
DE 102004012980 A1	30-09-2004	CA 2460622 A1	20-09-2004
		DE 102004012980 A1	30-09-2004
		FR 2852654 A1	24-09-2004
		NL 1025726 C2	09-11-2004
		US 2004262912 A1	30-12-2004