



(11) **EP 1 525 289 B9**

(12) **KORRIGIERTE EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(15) Korrekturinformation:  
**Korrigierte Fassung Nr. 1 (W1 B1)**  
**Korrekturen, siehe**  
**Beschreibung**  
**Ansprüche DE 1**  
**Zahlreiche Schreibfehler geringer Bedeutung**

(51) Int Cl.:  
**C10G 9/20** (2006.01) **C22C 38/40** (2006.01)  
**C22C 30/00** (2006.01)

(86) Internationale Anmeldenummer:  
**PCT/EP2003/004827**

(48) Corrigendum ausgegeben am:  
**29.02.2012 Patentblatt 2012/09**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:  
**WO 2004/015029 (19.02.2004 Gazette 2004/08)**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des  
Hinweises auf die Patenterteilung:  
**28.09.2011 Patentblatt 2011/39**

(21) Anmeldenummer: **03725176.6**

(22) Anmeldetag: **08.05.2003**

(54) **VERFAHREN UND RIPPENROHR ZUM THERMISCHEN SPALTEN VON  
KOHLENWASSERSTOFFEN**

METHOD AND RIBBED TUBE FOR THERMALLY CLEAVING HYDROCARBONS

PROCEDE ET TUBE A AILETTES POUR SEPARATION THERMIQUE D'HYDROCARBURES

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR**  
**HU IE IT LI LU MC NL PT RO SE SI SK TR**  
Benannte Erstreckungsstaaten:  
**AL LT LV MK**

- **GANSER, Benno**  
**63755 Alzenau (DE)**
- **JAKOBI, Dietlinde**  
**50733 Köln (DE)**
- **KIRCHHEINER, Rolf**  
**58644 Iserlohn (DE)**

(30) Priorität: **25.07.2002 DE 10233961**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:  
**27.04.2005 Patentblatt 2005/17**

(74) Vertreter: **König, Reimar et al**  
**König Szynka Tilmann von Renesse**  
**Patentanwälte Partnerschaft**  
**Postfach 11 09 46**  
**40509 Düsseldorf (DE)**

(60) Teilanmeldung:  
**10012045.0 / 2 298 850**

(73) Patentinhaber: **Schmidt + Clemens GmbH & Co.**  
**KG**  
**51789 Lindlar (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:  
**EP-A- 1 136 541 DE-A- 4 427 859**  
**DE-A- 19 523 280 US-A- 4 876 065**  
**US-A- 5 950 718 US-A1- 2001 001 399**

(72) Erfinder:  
• **WÖLPERT, Peter**  
**34289 Zierenberg (DE)**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

**EP 1 525 289 B9**

**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung bezieht sich auf ein Rippenrohr zum thermischen Spalten von Kohlenwasserstoffen in Anwesenheit von Dampf, bei dem das Einsatzgemisch durch außenbeheizte Rohre mit wendelförmigen Innenrippen geführt wird.

**[0002]** Für die Hochtemperaturpyrolyse von Kohlenwasserstoffen (Erdölderivate) haben sich Röhrenöfen bewährt, bei denen ein Kohlenwasserstoff/Wasserdampf-Gemisch bei Temperaturen über 750° C durch Reihen aus einzelnen oder mäanderförmig angeordneten Rohren (Crackrohrschlangen) aus hitzebeständigen Chrom-Nickel-Stahllegierungen mit hoher Oxidations- beziehungsweise Zunderbeständigkeit und hoher Aufkohlungsbeständigkeit geführt wird. Die Rohrschlangen bestehen aus vertikal verlaufenden geraden Rohrab schnitten, die über U-förmige Rohrbogen miteinander verbunden oder parallel zueinander angeordnet sind; sie werden üblicherweise mit Hilfe von Seitenwand- und teilweise auch mit Hilfe von Bodenbrennern beheizt und besitzen daher eine den Brennern zugekehrte sogenannte Sonnenseite sowie eine dem gegenüber um 90° versetzte, das heißt in Richtung der Rohrreihen verlaufende sogenannte Schattenseite. Dabei liegen die mittleren Rohrwandtemperaturen (TMT) teilweise über 1000° C.

**[0003]** Die Lebensdauer der Crackrohre hängt sehr wesentlich von der Kriechbeständigkeit und der Aufkohlungsbeständigkeit sowie von der Verkokungsgeschwindigkeit des Rohrwerkstoffs ab. Maßgeblich für die Verkokungsgeschwindigkeit, das heißt für das Anwachsen einer Schicht von Kohlenstoffablagerungen (Pyrolysekoks) an der Rohrrinnenwand sind neben der Art der eingesetzten Kohlenwasserstoffe die Spaltgastemperatur im Bereich der Innenwand und die sogenannte Crackschärfe, hinter der sich der Einfluß des Systemdrucks und der Verweilzeit im Rohrsystem auf die Äthylenausbeute verbirgt. Die Spaltschärfe wird anhand der mittleren Austrittstemperatur der Spaltgase (z. B. 850° C) eingestellt. Je höher die Gastemperatur in der Nähe der Rohr-Innenwand über dieser Temperatur liegt, um so stärker wächst die Schicht des Pyrolysekokes, deren isolierende Wirkung die Rohrwandtemperatur weiter steigen läßt. Obgleich die als Rohrwerkstoff zur Verwendung kommenden Chrom-Nickel-Stahllegierungen mit 0,4% Kohlenstoff über 25% Chrom und über 20% Nickel, beispielsweise 35% Chrom, 45% Nickel und gegebenenfalls 1% Niob eine hohe Aufkohlungsbeständigkeit besitzen, diffundiert der Kohlenstoff an Fehlstellen der Oxidschicht in die Rohrwandung und führt dort zu einer erheblichen Aufkohlung, die bis zu Kohlenstoffgehalten von 1% bis 3% in Wandtiefen von 0,5 bis 3 mm gehen kann. Verbunden damit ist eine erhebliche Versprödung des Rohrwerkstoffs mit der Gefahr einer Rißbildung bei, thermischer Wechselbelastung insbesondere beim An- und Abfahren des Ofens.

**[0004]** Um die Kohlenstoffablagerungen (Verkokung) an der Rohrrinnenwand abzubauen, ist es erforderlich, den Crackbetrieb von Zeit zu Zeit zu unterbrechen und den Pyrolysekoks mit Hilfe eines Dampf/Luft-Gemischs zu verbrennen. Dies erfordert eine Betriebsunterbrechung von bis zu 36 Stunden und beeinträchtigt daher erheblich die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens.

**[0005]** Bekannt ist aus der britischen Patentschrift 969 796 und der europäischen Offenlegungsschrift 1 136 541 A1 auch die Verwendung von Crackrohren mit Innenrippen. Solche Innenrippen ergeben zwar eine um viele Prozente, beispielsweise um 10% größere Innenoberfläche und demzufolge einen besseren Wärmeübergang; sie sind aber auch mit dem Nachteil eines im Vergleich zu einem Glatrohr erheblich erhöhten Druckverlustes infolge Reibung an der vergrößerten Rohr-Innenoberfläche verbunden. Der höhere Druckverlust erfordert einen höheren Systemdruck, dadurch verändert sich zwangsläufig die Verweilzeit und verschlechtert sich die Ausbeute. Hinzu kommt, daß sich die bekannten Rohrwerkstoffe mit hohen Gehalten an Kohlenstoff und Chrom nicht mehr durch Kaltverformen, beispielsweise Kaltziehen profilieren lassen. Sie besitzen den Nachteil, daß sich ihre Verformbarkeit mit zunehmender Warmfestigkeit stark verringert. Dies hat dazu geführt, daß die im Hinblick auf die Äthylenausbeute erwünschten hohen Rohrwandtemperaturen von beispielsweise bis 1050° C die Verwendung von Schleudergußrohren erfordern. Da sich Schleudergußrohre jedoch nur mit zylindrischer Wandung herstellen lassen, bedarf es besonderer Formgebungsverfahren, beispielsweise einer elektrolytisch abtragenden Bearbeitung oder eines formgebenden Schweißverfahrens, um Innen-Rippenrohre herzustellen.

**[0006]** Bekannt ist schließlich aus der US-Patentschrift 5 950 718 auch ein ganzes Spektrum von Neigungswinkeln und auch Abständen zwischen den Innenrippen, ohne daß jedoch die Beschaffenheit der Rippen in Betracht gezogen wird.

**[0007]** Vor diesem Hintergrund liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, die Wirtschaftlichkeit des thermischen Spaltens von Kohlenwasserstoffen in Röhrenöfen mit außenbeheizten Rohren mit wendelförmigen Innenrippen zu verbessern.

**[0008]** Die Lösung der Aufgabe besteht in einem Rippenrohr gemäß Anspruch 1.

**[0009]** Bei dem erfindungsgemäßen Rippenrohr nimmt eine Drallströmung an den Rippenflanken ablösenden Wirbel auf, so daß es nicht zu einer lokalen Rückführung des Wirbel nach Art einer in sich geschlossenen kreisförmigen Strömung in die Ripentäler kommt. Trotz der offensichtlich längeren Wege der Partikel durch die Spiralbahnen, ist die mittlere Verweilzeit niedriger als im Glatrohr und außerdem homogener über den Querschnitt (vgl. Fig. 7). Bestätigt wird dies durch die höhere Gesamtgeschwindigkeit im Profilrohr mit Drall (Profil 3) gegenüber dem Rohr mit geraden Rippen (Profil 2). Dies ist dann gewährleistet, wenn die Rippen in einem Winkel von vorzugsweise 25° bis 32,5° bezogen

auf die Rohrachse verlaufen.

**[0010]** Bei dem erfindungsgemäßen Rippenrohr wird das über den Rohrumfang zwischen Sonnen- und Schattenseite zwangsläufig unterschiedliche Wärmeangebot in der Rohrwandung und im Rohrinne ausgeglichen und dabei die Wärme rasch nach innen zur Kernzone abgeführt. Damit verbunden ist eine Verringerung der Gefahr einer lokalen Überhitzung des Prozeßgases an der Rohrwand und der dadurch verursachten Entstehung von Pyrolysekoks. Außerdem ist die thermische Beanspruchung des Rohrwerkstoffs infolge des Temperatenausgleichs zwischen Sonnen- und Schattenseite geringer, was zu einer Verlängerung der Lebensdauer führt. Schließlich kommt es bei dem erfindungsgemäßen Rippenrohr auch zu einer Vergleichmäßigung der Temperatur über den Rohrquerschnitt mit der Folge einer besseren Olefinausbeute. Der Grund hierfür ist, daß es ohne den erfindungsgemäßen radialen Temperatenausgleich im Rohrinne an der heißen Rohrwand zu einem Übercracken und in der Rohrmitte zu einer Rekombination von Spaltprodukten kommen würde.

**[0011]** Des weiteren bildet sich beim Glattrohr und verstärkt bei Rippenprofilen mit durch Rippen um mehr als 5%, beispielsweise 10% vergrößertem Innenumfang eine für turbulente Strömungen charakteristische Schicht laminarer Strömung mit stark reduziertem Wärmeübergang. Sie führt zu verstärkter Bildung von Pyrolysekoks mit ebenfalls schlechter Wärmeleitfähigkeit. Beide Schichten zusammen erfordern ein höheres Wärmeeinbringen beziehungsweise eine höhere Brennerleistung. Dies erhöht die Rohrwandtemperatur (TMT) und verkürzt demzufolge die Lebensdauer.

**[0012]** Die Erfindung vermeidet dies dadurch, daß der Innenumfang des Profils um maximal 5%, beispielsweise 4% oder auch 3,5%, bezogen auf den Umfang des die Rippentäler berührenden Hüllkreises beträgt. Anders ausgedrückt: der relative Profil-Umfang beträgt maximal 1,05 des Hüllkreis-Umfangs. Dementsprechend beträgt die Flächendifferenz des erfindungsgemäßen Profilrohrs, d.h. dessen abgewinkelte Innenfläche, bezogen auf ein Glattrohr mit dem Hüllkreisdurchmesser maximal +5% bzw. das 1,05-fache der Glattrohrfläche.

**[0013]** Das erfindungsgemäße Rohrprofil erlaubt ein geringeres spezifisches Rohrgewicht (kg/m) im Vergleich zu einem Rippenrohr, bei dem der Innenumfang des Profils mindestens 10% größer ist als der Umfang des Hüllkreises. Dies zeigt ein Vergleich zweier Rohre mit gleichem hydraulischen Durchmesser und demgemäß gleichem Druckverlust sowie gleichem wärmetechnischen Ergebnis.

**[0014]** Ein weiterer Vorteil des erfindungsgemäßen, auf den Hüllkreis-Umfang bezogenen Profil-Umfangs (relativer Profil-Umfang) besteht in einem rascheren Aufheizen des Einsatzgases bei reduzierter Rohrwandtemperatur.

**[0015]** Die erfindungsgemäß erzeugte Drallströmung verringert die Laminarschicht ganz erheblich; sie ist zudem mit einem zum Rohrzentrum gerichteten Geschwindigkeitsvektor verbunden, der die Verweilzeit von Crack-Radikalen beziehungsweise Spaltprodukten an der heißen Rohrwand sowie deren chemische und katalytische Umsetzung zu Pyrolysekoks verringert. Zusätzlich werden die bei Innenprofilrohren mit hohen Rippen nicht unerheblichen Temperaturunterschiede zwischen Rippentälern und Rippen durch die erfindungsgemäße Drallströmung ausgeglichen. Damit vergrößert sich der zeitliche Abstand zwischen zwei notwendigen Entkokungen. Ohne die erfindungsgemäße Drallströmung ergibt sich zwischen den Rippenkuppen und dem Grund der Rippentäler ein nicht unerheblicher Temperaturunterschied. Die Verweilzeit der zur Verkokung neigenden Spaltprodukte ist bei mit wendelförmigen Innenrippen versehenen Crackrohren kürzer; Dies ist im Einzelfall von der Beschaffenheit der Rippen abhängig.

**[0016]** Das Diagramm zeigt:

obere Kurve:	Profil 6:	16° Steigung
mittlere Kurve:	Profil 3:	30° Steigung
untere Kurve:	Profil 4:	3 Rippen mit 30° Steigung

**[0017]** Der Kurvenverlauf zeigt deutlich, dass die höhere Umfangsgeschwindigkeit des Profils 8 mit 4,8 mm hohen Rippen innerhalb der Rippentäler aufgezehrt wird, während die Umfangsgeschwindigkeit des erfindungsgemäßen Profils mit einer Rippenhöhe von nur 2 mm in den Kern der Strömung eindringt. Die Umfangsgeschwindigkeit des Profils 4 mit nur 3 Rippen ist zwar annähernd so hoch, bewirkt aber keine spiralförmige Beschleunigung der Kernströmung.

**[0018]** Das erfindungsgemäße Profil bewirkt nach dem Kurvenverlauf im Diagramm der Fig. 2 eine spiralförmige Beschleunigung in den Rippentälern (oberer Kurvenast), die weite Bereich des Rohrquerschnitts erfasst und damit eine Homogenisierung der Temperatur im Rohr bewirkt. Die geringere Umfangsgeschwindigkeit an den Rippenkuppen (unterer Kurvenast) gewährleistet darüber hinaus, dass es nicht zu Verwirbelungen und Rückströmungen kommt.

**[0019]** In Fig. 3 sind drei Versuchsrohre mit ihren Daten im Querschnitt dargestellt, darunter auch das erfindungsgemäße Profil 3. Die Diagramme geben jeweils den Temperaturverlauf über den Rohrhalsmesser (Radius) auf der Schatten- und der Sonnenseite wieder. Ein Vergleich der Diagramme zeigt die geringere Temperaturdifferenz zwischen Rohrwand und -zentrum sowie die geringere Gastemperatur an der Rohrwand bei dem erfindungsgemäßen Profil 3.

**[0020]** Die erfindungsgemäß erzeugte Drallströmung gewährleistet, daß die Schwankung der Innenwandtemperatur über den Rohrumfang, das heißt zwischen Sonnen- und Schattenseite unter 12° C liegt, obgleich die üblicherweise in parallelen Reihen angeordneten Rohrschlangen eines Röhrenofens mit Hilfe von Seitenwandbrennern lediglich auf

einander gegenüberliegenden Seiten beheizt beziehungsweise mit Verbrennungsgasen beaufschlagt werden und die Rohre somit jeweils eine den Brennern zugekehrte Sonnenseite und eine um 90° dazu versetzte Schattenseite besitzen. Die mittlere Rohrwandtemperatur, das heißt die Differenz der Rohrwandtemperatur zwischen Sonnen- und Schattenseite führt zu inneren Spannungen und bestimmt daher die Lebensdauer der Rohre. So ergibt die aus dem Diagramm der Fig. 4 ersichtliche Verringerung der mittleren Rohrwandtemperatur eines erfindungsgemäßen Rohrs mit acht Rippen einer Steigung von 30°, einem Rohrrinnendurchmesser von 38,8 mm und einem Rohraußendurchmesser von 50,8 mm, somit einer Höhendifferenz zwischen Rippentälem und Rippenkuppen von 2 mm von 11° im Vergleich zu einem durchmessergleichen Glattrohr, bezogen auf eine mittlere Lebensdauer von 5 Jahren, bei einer Betriebstemperatur von 1050 °C eine rechnerische Lebensdauererhöhung auf etwa 8 Jahre.

**[0021]** Die Temperaturverteilung zwischen Sonnen- und Schattenseite für die drei Profile der Fig.3 ergibt sich aus dem Diagramm der Fig. 5. Bemerkenswert ist dabei das niedrigere Niveau der Temperatur-Kurve für das Profil 3 im Vergleich zum Glattrohr (Profil 0) und die erheblich geringere Schwankungsbreite der Profil 3-Kurve im Vergleich zu der Profil 1-Kurve.

**[0022]** Eine besonders günstige Temperaturverteilung stellt sich ein, wenn die Isothermen von der Rohrrinnenwand zum Kern der Strömung spiralförmig verlaufen.

**[0023]** Eine gleichmäßigere Verteilung der Temperatur über den Querschnitt ergibt sich insbesondere, wenn sich die Umfangsgeschwindigkeit innerhalb von 2 bis 3 m aufbaut und dann über die gesamte Rohrlänge konstant bleibt.

**[0024]** Das erfindungsgemäße Verfahren sollte im Hinblick auf eine hohe Olefinausbeute bei vergleichsweise kurzer Rohrlänge so betrieben werden, daß der Homogenitätsfaktor der Temperatur über den Querschnitt und der auf den hydraulischen Durchmesser bezogene Homogenitätsfaktor der Temperatur im Verhältnis zum Homogenitätsfaktor eines Glattrohrs ( $H_{G\emptyset}$ ) über 1 liegt. Dabei sind die Homogenitätsfaktoren wie folgt definiert:

$$H_{G\emptyset} [-] H_{P\emptyset} = \Delta T_0 \cdot d_x / \Delta T_x \cdot d_0$$

**[0025]** Das erfindungsgemäß erzeugte Strömungsbild aus Kern- und Drallströmung läßt sich mit einem Rippenrohr erreichen, bei dem der Flankenwinkel der jeweils über die Länge eines Rohrstücks durchgehenden Rippen, das heißt der Außenwinkel zwischen den Rippenflanken und dem Radius des Rohrs 16° bis 25°, vorzugsweise 19° bis 21° beträgt. Ein derartiger Flankenwinkel gewährleistet in Verbindung mit einer Rippensteigung von 20° bis 40°, beispielsweise 22,5° bis 32,5°, daß sich in den Rippentälern nicht eine mehr oder weniger in sich geschlossene, hinter die Rippenflanken in die Rippentäler zurückkehrende Wirbelströmung ergibt, die in den Rippentälern zum Entstehen unerwünschter "Twisters", das heißt von geschlossene Wirbelzöpfen führt. Vielmehr lösen sich die sich in den Rippentälern entstehenden Wirbel von den Rippenflanken ab und werden von der Drallströmung aufgenommen. Die von den Rippen induzierte Drallenergie beschleunigt die Gaspartikel und führt zu einer höheren Gesamtgeschwindigkeit. Dies führt zu einer Verminderung und Vergleichmäßigung der Rohrwandtemperatur und zu einer Vergleichmäßigung der Temperatur und der Verweildauer über den Rohrquerschnitt.

**[0026]** Die Beschaffenheit des erfindungsgemäßen Rippenrohrs ergibt sich aus der Darstellung eines Rohrsegments in Fig. 6 und den zugehörigen charakteristischen Parametern

- hydraulischer Durchmesser  $D_h$  in mm,  $RI \leq D_h / 2$
- Flankenwinkel  $\beta$
- Rippenhöhe  $H$
- Hüllkreis-Radius  $R_a = RI + H$  und  $Da = 2 \times R_a$
- Zentrumsinkel  $\alpha$
- Krümmungsradius  $R = R_a (\sin \alpha / 2 \sin \beta + \sin \alpha)$
- Hüllkreis-Umfang  $2 \pi R_a$
- Winkel im schiefwinkligen Dreieck  $\gamma = 180 - (\alpha + \beta)$
- Innen-Radius  $R_i = 2R (\sin \gamma / \sin \alpha) - R$
- Rippenhöhe  $H = R_a - R_i$
- Profil-Umfang  $U_p = 2 \times \text{Rippenzahl} \times nR / 180 (2 \beta + \alpha)$
- Rippenfläche  $F_R$
- Fläche des Hüllkreises  $F_a = \pi Da^2 / 4$
- Fläche des Innenkreises  $F_i = \pi \cdot DI$
- Profilfläche Innerhalb des Hüllkreises  $F_p = F_R \cdot \text{Rippenzahl}$
- Profil-Umfang  $U_p = \text{maximal } 1,05 \cdot 2 \pi R_a$

**[0027]** Die Rippen und die zwischen den Rippen befindlichen Rippentäler sind im Querschnitt spiegelsymmetrisch

ausgebildet und bildet eine Wellenlinie mit jeweils gleichen Krümmungsradien. Der Flankenwinkel ergibt sich dann zwischen den Tangenten der jeweils beiden Krümmungsradien im Berührungspunkt und dem Radius des Rohrs. Dabei sind die Rippen verhältnismäßig flach; Rippenhöhe und Flankenwinkel werden so aufeinander abgestimmt, dass der hydraulische Durchmesser des Profils aus dem Verhältnis 4 x freier Querschnitt/Profilumfang gleich oder grösser ist als der Innenkreis des Profils. Der hydraulische Durchmesser liegt daher im inneren Drittel der Profilhöhe. Damit steigen die Rippenhöhe und die Zahl der Rippen mit zunehmendem Durchmesser so, daß die Drallströmung in der für die Wirkung des Profils erforderlichen Richtung und Stärke erhalten bleibt.

**[0028]** Zwischen den Rippen bzw. in den Rippentälern ergibt sich eine größere Strömungsgeschwindigkeit (Fig. 2), die zu einem Selbstreinigungseffekt, daher zu weniger Ablagerungen von Pyrolysekoks führt.

**[0029]** Versuche haben ergeben, daß - unabhängig vom Innendurchmesser der Rohre - insgesamt 8 bis 12 Rippen ausreichend sind, um das erfindungsgemäße Strömungsbild zu erreichen.

**[0030]** Bei dem erfindungsgemäßen Rippenrohr beträgt das Verhältnis der Quotienten der Wärmeübergangskoeffizienten  $Q_R / Q_0$  zum Quotienten der Druckverluste  $\Delta P_R / \Delta P_0$  im Wasserversuch unter Benutzung und Beachtung der Ähnlichkeitsgesetze und Verwendung der für ein Naphta/Wasserdampf-Gemisch vermittelten Reynoldszahlen, vorzugsweise 1,4 bis 1,5, wobei R ein Rippenrohr und 0 ein Glattrohr kennzeichnet.

**[0031]** Die Überlegenheit des erfindungsgemäßen Rippenrohr (Profil 3) im Vergleich zu einem Glattrohr (Profil 0) sowie einem Rippenrohr mit achsparallelen Rippen (Profil 1), bei denen der radiale Abstand zwischen den Rippentälern und den Rippenkuppen 4,8 mm beträgt veranschaulichen die Daten der nachfolgenden Tabelle. Die Rippenrohre besaßen sämtlich 8 Rippen sowie denselben Hüllkreis.

PROFIL	0	1	3
Fluidtemp. bei 9950 mm In der Mitte $T_m$ [°C]	843,6	848,1	843,0
Fluidtemp. bei 9950 mm am Rand $T_r$ [°C]	888,9	894	874,8
Temperaturspanne bei 9950 mm $\Delta T = T_r - T_m$ [°C]	45,3	45,9	31,8
Hormogenitätsfaktor zum Glattrohr $H_t = \Delta T_q / \Delta T_x$	1	0,9869281	1,4245283
Hydr. Durchmesser $d_h$ [m]	0,0380	0,0258	0,0344
bezogener Homogenitätsfaktor bzgl. hydr. Ø zum Glattrohr $H_{t\varnothing} = \Delta T_0 \cdot d_x / \Delta T_x \cdot d_o$	1	0,8477193	1,3420558
Rang H:	2	2	1

**[0032]** Dabei ist der hydraulische Durchmesser wie folgt definiert:

$$D_{\text{hydr}} = 4 \times (\text{freier Querschnitt}) / \text{Innenumfang};$$

er entspricht vorzugsweise dem Innendurchmesser eines vergleichbaren Glattrohrs und ergibt dann einen Homogenitätsfaktor von 1,425.

**[0033]** Das erfindungsgemäße Rippenrohr ergibt im Wasserversuch einen um den Faktor 2,56 höheren Wärmeübergang ( $Q_R$ ) im Vergleich zum Glattrohr bei einem nur um den Faktor 1,76 erhöhten Druckverlust ( $\Delta P_R$ ).

**[0034]** In Fig. 7 sind einem Rohr mit glatter Innenwand (Glattrohr) drei verschiedene Profilrohre gegenübergestellt, darunter ein erfindungsgemäßes Rohr mit 8 Rippen mit einer Steigung von jeweils 30°. Zu Jedem Querschnitt sind der hydraulische Durchmesser, die Axialgeschwindigkeit, die Verweilzeit und der Druckverlust angegeben.

**[0035]** Ausgangsdaten waren die Durchsatzmengen eines in Betrieb befindlichen Glattrohrs mit 38 mm Innendurchmesser, der mit dem hydraulischen Durchmesser identisch ist. Diese Daten wurden nach den Ähnlichkeitsgesetzen (gleiche Reynoldszahlen) auf warmes Wasser umgerechnet und den Versuchen zu Grunde gelegt (siehe Verhältnis der Quotienten des Wärmeüberganges und des Druckverlusts für Versuche mit Wasser sowie den bezogenen Homogenitätsfaktor bei der Rechnung mit Gasen).

**[0036]** Die unterschiedlichen Geschwindigkeitsprofile ergeben sich aus gleichen Durchsatzmengen bei unterschiedlichen hydraulischen Durchmessern (reziprokes Verhältnis).

**[0037]** Der Vergleich der Geschwindigkeiten bei den im Querschnitt gleichen Profilen 2 und 3 verdeutlicht die bessere Geschwindigkeit, Beschleunigung und Verweilzeit bei den erfindungsgemäßen Rohren (Profil 3). Bei gleichem hydraulischen Durchmesser bewirkt die durch den Drall der Rippen verursachte Geschwindigkeits-Komponente in Umfangsrichtung ein Ablösen der Strömung von der Rohrwand und eine schraubenförmig ansteigende Geschwindigkeit im

gesamten Querschnitt.

**[0038]** Durch die gerichtete, spiralförmige Strömung wird die Wärme von der Rohrwand in die Strömung eingetragen und damit gleichmäßiger verteilt als in einer normalen ungerichteten turbulenten Strömung (Glattrohr, Profile 1 und 2). Gleiches gilt für die Verweilzeit der Partikel. Die spiralförmig gerichtete Strömung verteilt die Partikel gleichmäßiger über den Querschnitt während die Beschleunigung an den Profilflanken die mittleren Verweilzeit reduziert. Der höhere Druckverlust des Profils 3 resultiert aus der Umfangsgeschwindigkeit. Bei Profil 1 liegt die Ursache in der starken Einschnürung der Strömung und dem Reibungsverlust an der großen Innenfläche des Profils.

**[0039]** Die erfindungsgemäßen Rippenrohr lassen sich je nach Werkstoff beispielsweise aus einem Schleudergußrohr dadurch herstellen, daß die Enden eines Rohres mit achsparallelen Rippen gegeneinander verdreht werden, oder daß das Innenprofil durch Vorformen eines Schleudergußrohrs, beispielsweise durch Warm Schmieden, Warmziehen oder Kaltverformen über ein Profilwerkzeug, beispielsweise einen fliegenden Dorn oder einer Dornstange mit einem dem Innenprofil des Rohrs entsprechenden Außenprofil erzeugt wird.

**[0040]** Schneidemaschinen zum Innenprofilieren von Rohren sind in verschiedenen Varianten beispielsweise aus der deutschen Patentschrift 195 23 280 bekannt. Diese Maschinen eignen sich auch zum Herstellen eines erfindungsgemäßen Rippenrohrs.

**[0041]** Beim Warmumformen sollte die Umformtemperatur so eingestellt werden, daß es im Bereich der Innenoberfläche zu einer partiellen Zerstörung des Gefügekorns und demzufolge später unter dem Einfluß der Betriebstemperatur zu einer Rekristallisation kommt. Die Folge davon ist ein feinkörniges Gefüge, das eine rasche Diffusion von Chrom, Silizium und/ oder Aluminium durch die austenitische Matrix zur Innenoberfläche des Rohrs und dort zum schnellen Aufbau einer oxidischen Schutzschicht führt.

**[0042]** Die Innenoberfläche des erfindungsgemäßen Rohrs sollte eine möglichst geringe Rauigkeit besitzen; sie kann daher geglättet, beispielsweise mechanisch poliert oder elektrolytisch egalisiert sein.

**[0043]** Als Rohrwerkstoff eignen sich für den Einsatz in Äthylenanlagen Eisen- beziehungsweise Nickel-Legierungen mit 0,1% bis 0,5% Kohlenstoff, 20 bis 35% Chrom, 20 bis 70% Nickel, bis 3% Silizium, bis 1% Niob, bis 5% Wolfram sowie Zusätzen von Hafnium, Titan, Seltenen Erden, oder Zirkonium, von jeweils bis 0,5% und bis 6% Aluminium.

## Patentansprüche

1. Rippenrohr zum thermischen Cracken von Kohlenwasserstoffen in Anwesenheit von Dampf, **gekennzeichnet durch** mit einem Neigungswinkel von  $20^\circ$  bis  $40^\circ$ , bezogen auf die Rohrachse geneigte, wendelförmig verlaufende Innenrippen und in Form einer Wellenlinie mit jeweils gleichem Krümmungsradius spiegelbildlich aneinander grenzenden Rippentälern und Rippenkuppen, bei denen der Flankenwinkel ( $\beta$ ) der jeweiligen Tangente im Berührungspunkt der beiden Krümmungsradien ( $R$ ) in Bezug auf die Senkrechte auf den Radius( $R_i$ ) des die Rippenkuppen berührenden Kreises im Gipfelpunkt jeweils eines Rippentals bzw. einer Rippenkuppe  $16^\circ$  bis  $25^\circ$  beträgt.
2. Rippenrohr nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet daß** der Neigungswinkel  $22,5^\circ$  bis  $32,5^\circ$  beträgt.
3. Rippenrohr nach Anspruch 1 oder 2 **dadurch gekennzeichnet, daß** der Innenumfang des Profils um maximal 5 % bezogen auf den Umfang des die Rippentäler berührenden Hüllkreises größer ist.
4. Rippenrohr nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, daß** der Flankenwinkel ( $\beta$ ) der Rippen  $19$  bis  $21^\circ$  beträgt.
5. Rippenrohr nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **gekennzeichnet durch** insgesamt sechs bis zwölf Rippen.
6. Rippenrohr nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, daß** der hydraulische Durchmesser des Rippenrohrs mindestens gleich dem Durchmesser des Innenkreises ( $R_i$ ) ist.
7. Rippenrohr nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet daß** das Verhältnis der Wärmeübergangskoeffizienten  $Q_R/Q_0$  zum Quotienten der Druckverluste  $\Delta P_R/P_0$  im Wasserversuch 1,4 bis 1,5 beträgt, wobei  $R$  ein Rippenrohr und  $0$  ein Glattrohr kennzeichnet.
8. Rippenrohr nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, daß** der Krümmungsradius ( $R$ ) des Rippenquerschnitts 3,5 bis 20 mm beträgt.
9. Rippenrohr nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **gekennzeichnet durch** eine Rippenhöhe ( $H$ ) von 1,25 bis 3 mm.

10. Rippenrohr nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet, daß** der freie Querschnitt innerhalb des Profilmfanges ( $U_p$ ) 85 bis 95% der Fläche des Hüllkreises ( $F_a$ ) beträgt.
11. Rippenrohr nach einem der Ansprüche 1 bis 13, **dadurch gekennzeichnet, daß** die Profilfläche ( $F_p$ ) 40 bis 50% der Ringfläche zwischen dem Hüllkreis und dem Innenkreis beträgt.
12. Rippenrohr nach einem der Ansprüche 1 bis 11 aus Schleuderguß aus einer Nickellegierung mit 0,1 bis 0,5% Kohlenstoff, 20 bis 35% Chrom, 20 bis 70% Nickel, bis 3% Silizium, bis 1% Niob, bis 5% Wolfram sowie jeweils bis 0,5% Hafnium, Titan, Seltene Erdmetalle, Zirkonium und bis 6% Aluminium.
13. Rippenrohr nach Anspruch 12, bei dem die Legierung einzeln oder nebeneinander mindestens 0,02% Silizium, 0,1% Niob, 0,3% Wolfram und 1,5% Aluminium enthält.

## Claims

1. Finned tube for thermally cracking hydrocarbons in the presence of steam, **characterised by** inner fins running helically, inclined at an angle of inclination of  $20^\circ$  to  $40^\circ$  in relation to the tube axis, and fin valleys and fin peaks in the form of a wave line in each case having the same radius of curvature and adjoining one another mirror-symmetrically, in which the flank angle ( $\beta$ ) of the respective tangent at the contact point of the two radii of curvature ( $R$ ) in relation to the perpendicular on the radius ( $R_i$ ) of the circle touching the fin peaks at the culmination point of a fin valley and a fin peak respectively is  $16^\circ$  to  $25^\circ$ .
2. Finned tube according to Claim 1, **characterised in that** the angle of inclination is  $22.5^\circ$  to  $32.5^\circ$ .
3. Finned tube according to Claim 1 or 2, **characterised in that** the inner circumference of the profile is greater by at most 5% in relation to the circumference of the envelope circle touching the fin valleys.
4. Finned tube according to any one of Claims 1 to 3, **characterised in that** the flank angle ( $\beta$ ) of the fins is  $18^\circ$  to  $21^\circ$ .
5. Finned tube according to any one of Claims 1 to 4, **characterised by** six to twelve fins in total.
6. Finned tube according to any one of Claims 1 to 5, **characterised in that** the hydraulic diameter of the finned tube is at least equal to the diameter of the inner circle ( $R_i$ ).
7. Finned tube according to any one of Claims 1 to 6, **characterised in that** the ratio of the heat transfer coefficients  $Q_R/Q_0$  to the quotient of the pressure losses  $\Delta P_R/P_0$  in a water test is 1.4 to 1.5, wherein R indicates a finned tube and 0 a smooth tube.
8. Finned tube according to any one of Claims 1 to 7, **characterised in that** the radius of curvature ( $R$ ) of the fin cross section is 3.5 to 20 mm.
9. Finned tube according to any one of Claims 1 to 8, **characterised by** a fin height ( $H$ ) of 1.25 to 3 mm.
10. Finned tube according to any one of Claims 1 to 9, **characterised in that** the clear cross section within the profile circumference ( $U_p$ ) is 85 to 95% of the area of the envelope circle ( $F_a$ ).
11. Finned tube according to any one of Claims 1 to 13, **characterised in that** the profile area ( $F_p$ ) is 40 to 50% of the annular area between the envelope circle and the inner circle.
12. Finned tube according to any one of Claims 1 to 11 made from centrifugally cast material consisting of a nickel alloy having 0.1 to 0.5% carbon, 20 to 35% chromium, 20 to 70% nickel, up to 3% silicon, up to 1% niobium, up to 5% tungsten, as well as in each case up to 0.5% hafnium, titanium, rare earth metals, zirconium and up to 6% aluminium.
13. Finned tube according to Claim 12, in which the alloy contains individually or in parallel at least 0.02% silicon, 0.1% niobium, 0.3% tungsten and 1.5% aluminium.

## Revendications

- 5 1. Tube à ailettes pour le craquage thermique d'hydrocarbures en présence de vapeur, **caractérisé par** des ailettes intérieures inclinées à un angle d'inclinaison de 20° à 40° par rapport à l'axe de tube et en forme de ligne ondulée s'étendant en hélice, avec des creux d'ailette et des sommets d'ailette contigus symétriquement de même rayon de courbure, dont l'angle de flanc ( $\beta$ ) de la tangente respective au point de contact des deux rayons de courbure (R) par rapport à la perpendiculaire au rayon ( $R_i$ ) du cercle qui touche les sommets d'ailette au point culminant d'un creux d'ailette ou d'un sommet d'ailette est compris entre 18° et 25°.
- 10 2. Tube à ailettes selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** l'angle d'inclinaison est compris entre 22,5° et 32,5°.
3. Tube à ailettes selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé en ce que** la circonférence intérieure du profil est plus grande de 5 % au maximum que la circonférence du cercle enveloppant qui touche les creux d'ailette.
- 15 4. Tube à ailettes selon une des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce que** l'angle de flanc ( $\beta$ ) des ailettes est compris entre 19° et 21°.
5. Tube à ailettes selon une des revendications 1 à 4, **caractérisé par** six à douze ailettes au total.
- 20 6. Tube à ailettes selon une des revendications 1 à 5, **caractérisé en ce que** le diamètre hydraulique du tube à ailettes est au moins égal au diamètre du cercle intérieur ( $R_i$ ).
7. Tube à ailettes selon une des revendications 1 à 6, **caractérisé en ce que** le rapport des coefficients de transfert thermique  $Q_R/Q_Q$  au quotient des pertes de pression  $\Delta P_R/\Delta P_0$  est compris entre 1,4 et 1,5 dans l'essai à l'eau, R désignant un tube à ailettes et 0 un tube lisse.
- 25 8. Tube à ailettes selon une des revendications 1 à 7, **caractérisé en ce que** le rayon de courbure (R) de la section d'ailette est compris entre 3,5 et 20 mm.
- 30 9. Tube à ailettes selon une des revendications 1 à 8, **caractérisé par** une hauteur d'ailette (H) comprise entre 1,25 et 3 mm.
10. Tube à ailettes selon une des revendications 1 à 9, **caractérisé en ce que** la section libre à l'intérieur de la circonférence de profil ( $U_p$ ) est comprise entre 85 et 95 % de la surface du cercle enveloppant ( $F_a$ ).
- 35 11. Tube à ailettes selon une des revendications 1 à 10, **caractérisé en ce que** la surface de profil ( $F_p$ ) est comprise entre 40 et 50 % de la surface annulaire entre le cercle enveloppant et le cercle intérieur.
- 40 12. Tube à ailettes selon une des revendications 1 à 11 en fonte centrifugée composée d'un alliage de nickel avec 0,1 à 0,5 % de carbone, 20 à 35 % de chrome, 20 à 70 % de nickel, jusqu'à 3 % de silicium, jusqu'à 1 % de niobium, jusqu'à 5 % de tungstène ainsi que respectivement jusqu'à 0,5 % de hafnium, titane, métaux terreux rares, zirconium et jusqu'à 6 % d'aluminium, fer résiduel.
- 45 13. Tube à ailettes selon la revendication 12, dans lequel l'alliage contient isolément ou simultanément au moins 0,02 % de silicium, 0,1 % de niobium, 0,3 % de tungstène et 1,5 % d'aluminium.



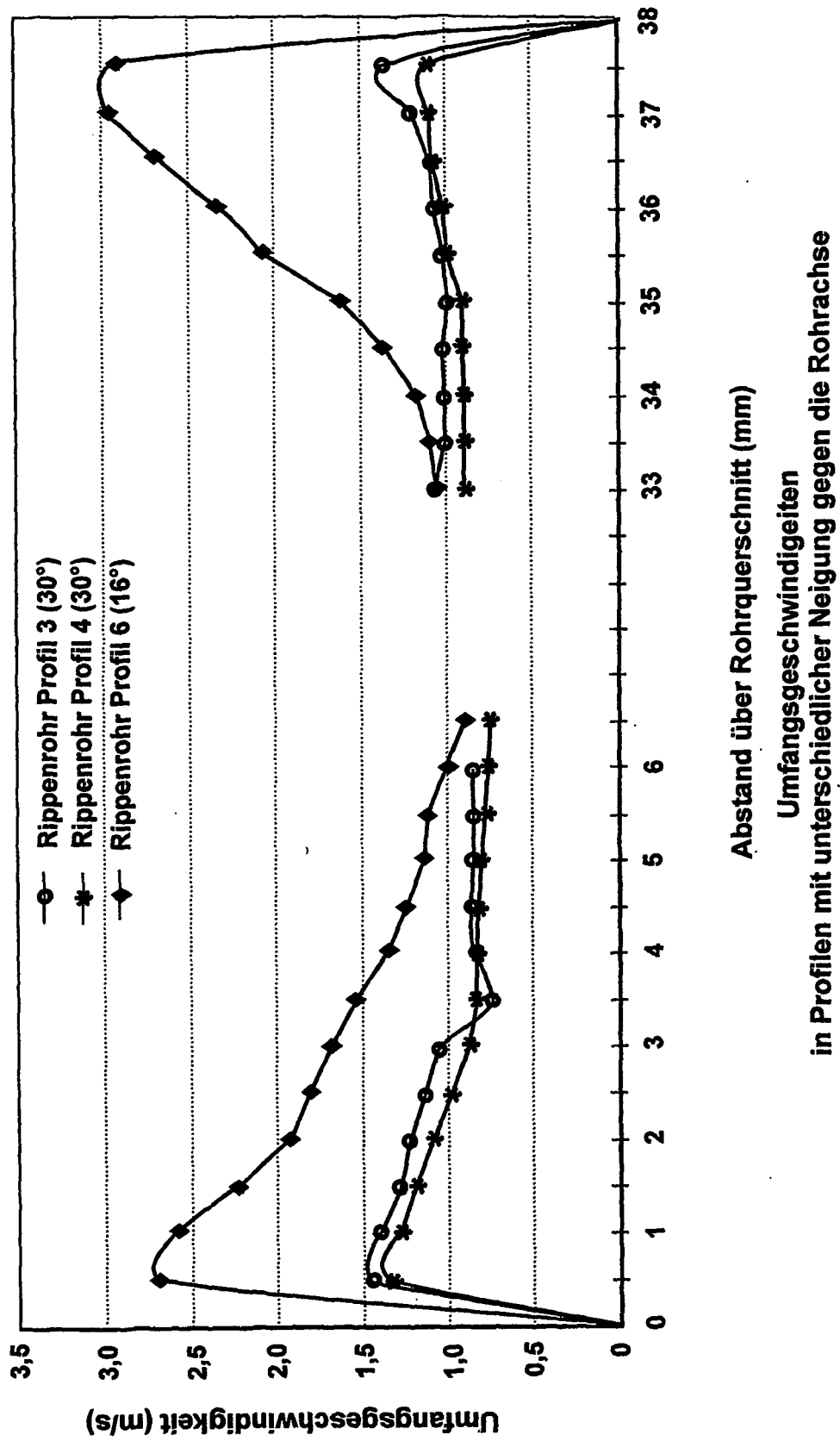
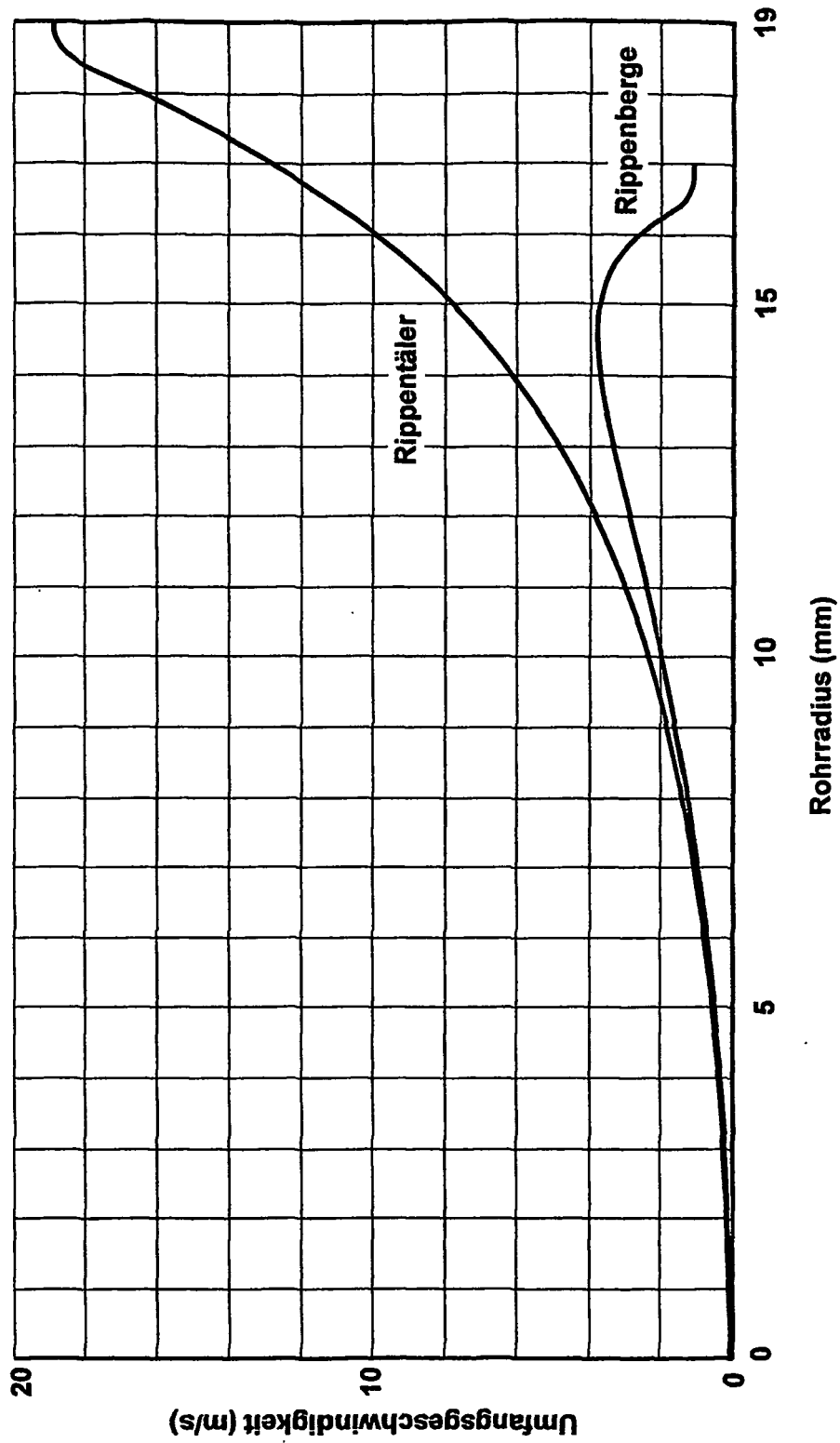
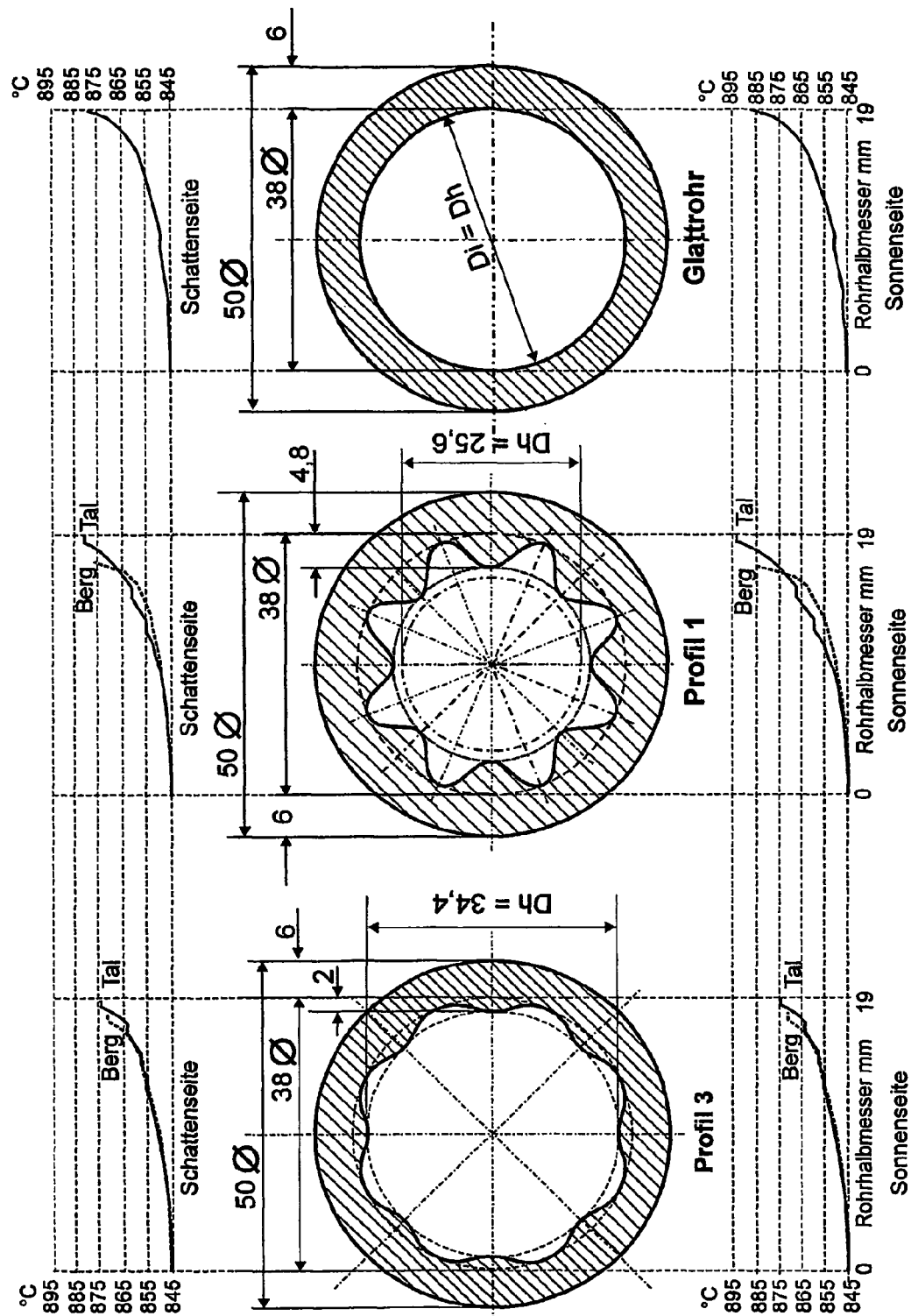


Fig. 1



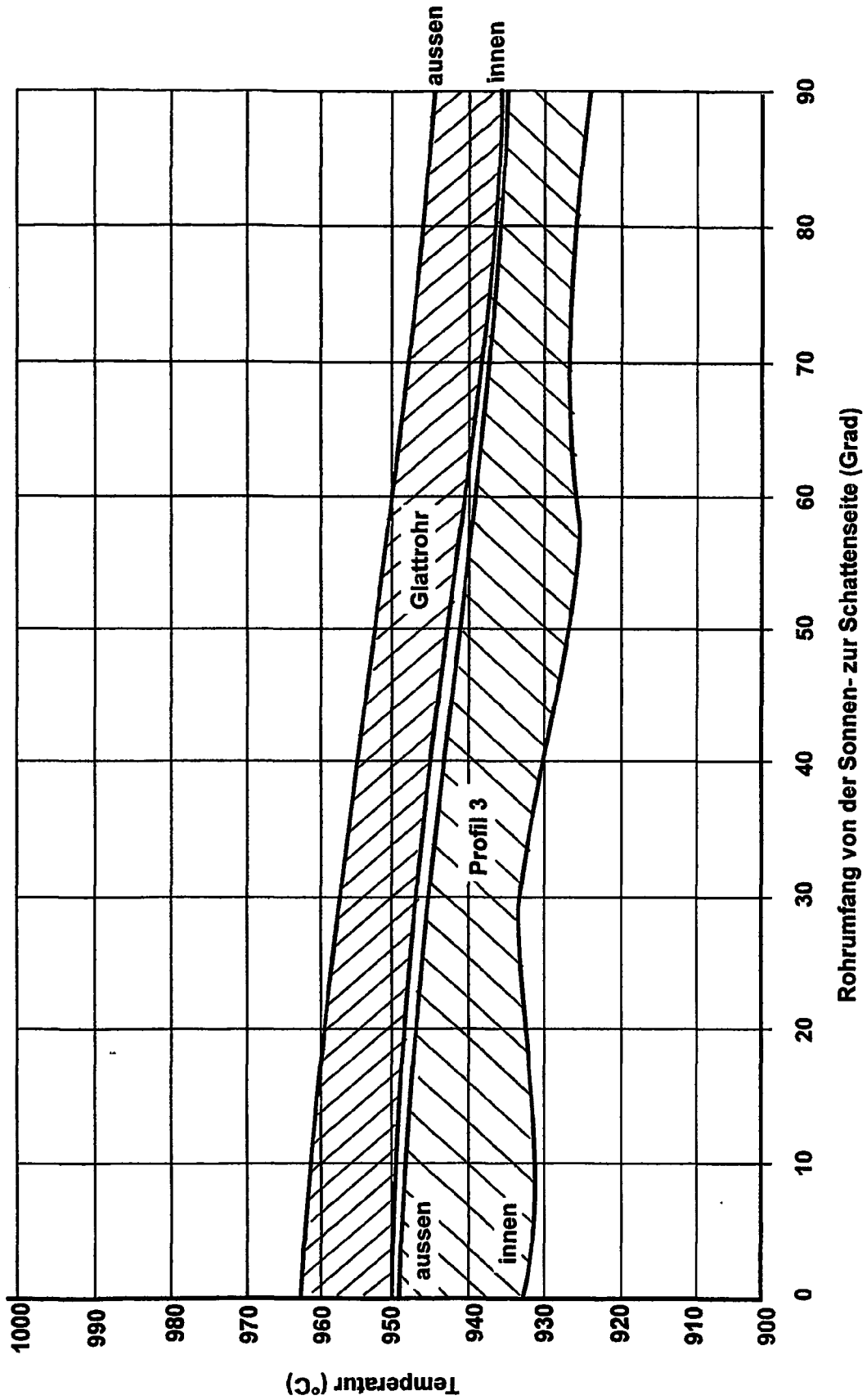
Verteilung der Umfangsgeschwindigkeiten im Profil 3 mit 30° Steigung  
über den Halbmesser (Radius) des Profilrohres

Fig. 2



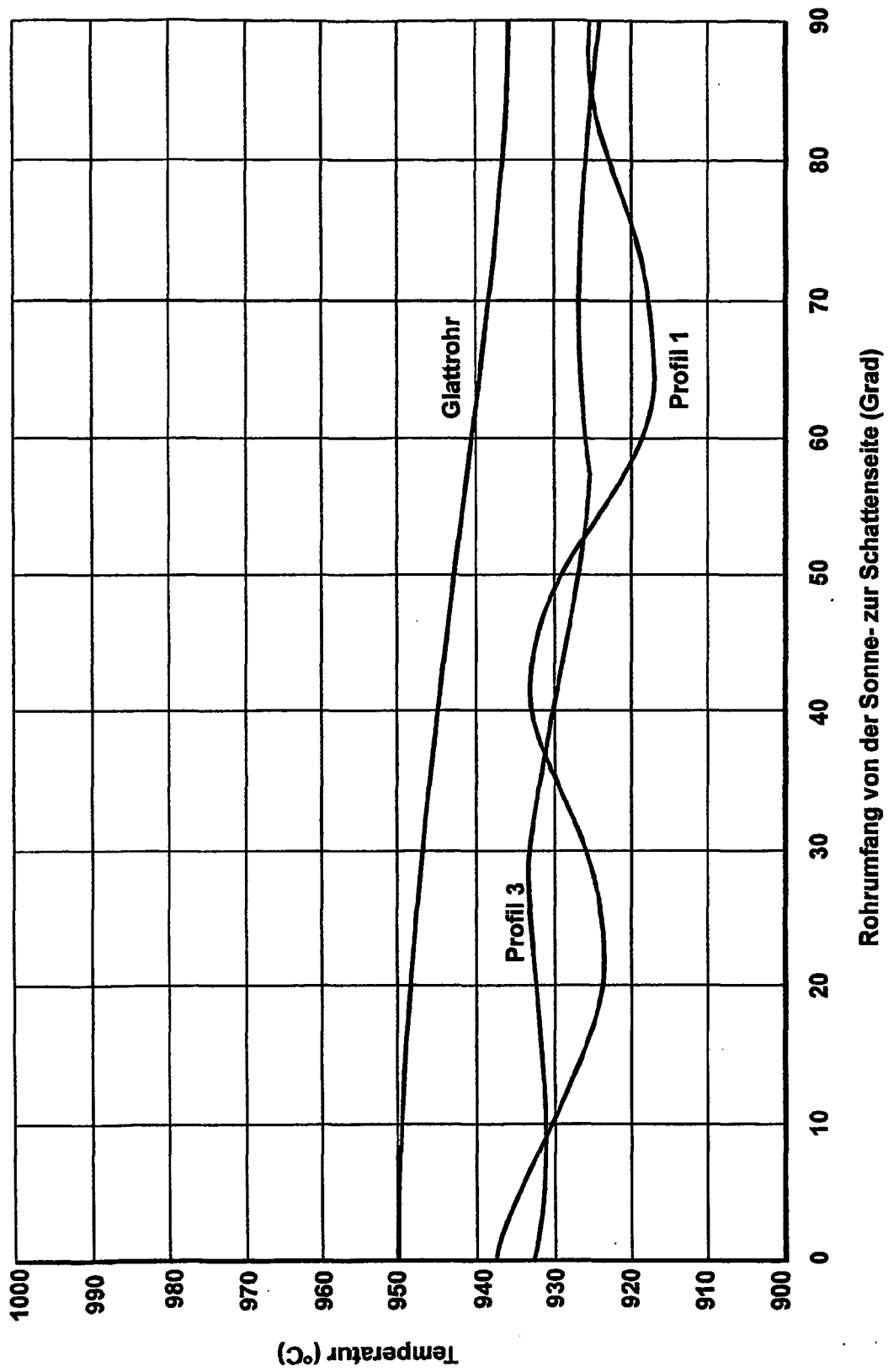
Profilformen mit Temperaturprofil im Fluid (Naphta) bei 9950 mm  
aufgetragen über einen Halbmesser im Rohr (Berg = Profilkuppe, Tal = Profiltal)

Fig. 3



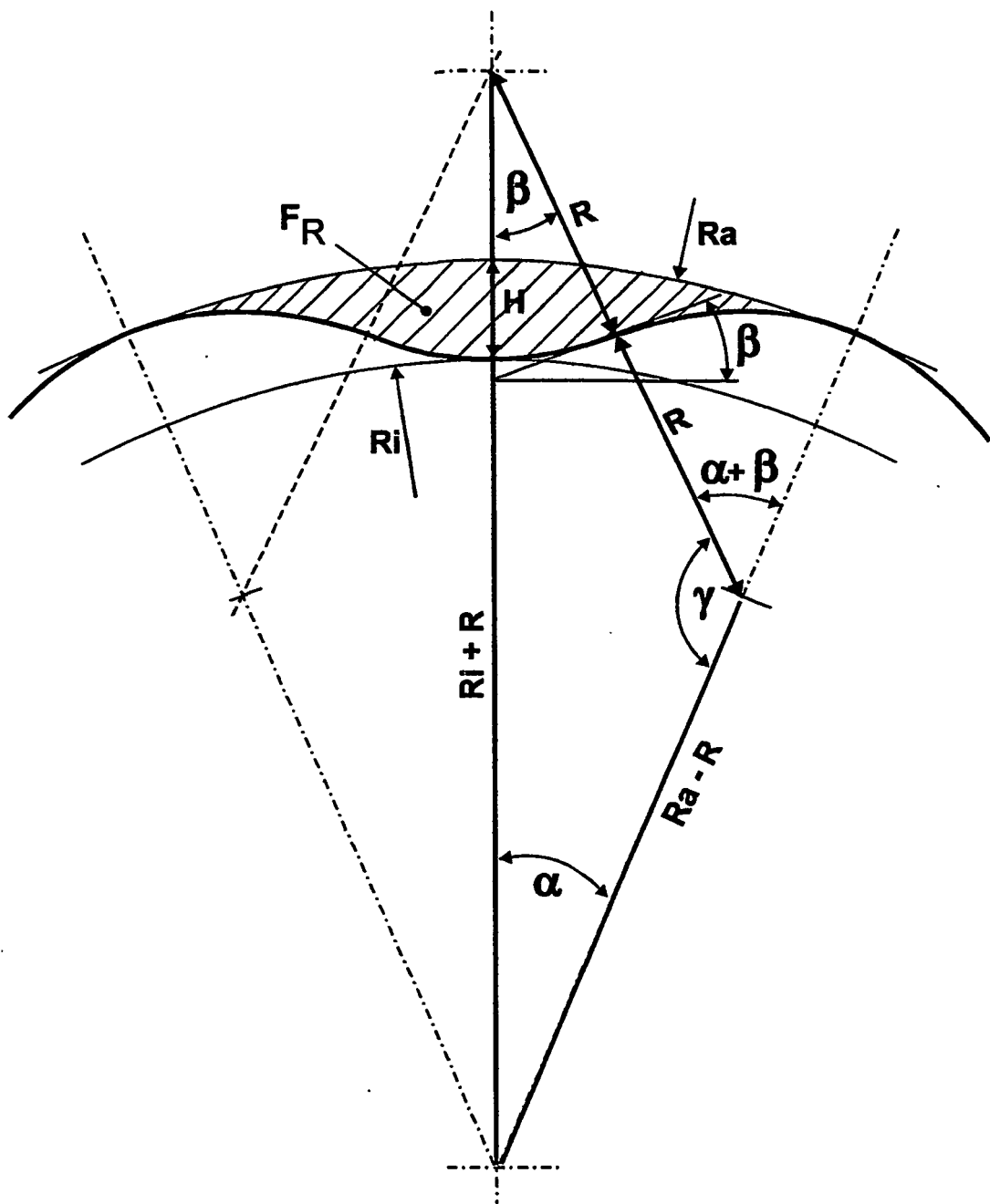
Vergleich der Rohrwandtemperaturen

Fig. 4



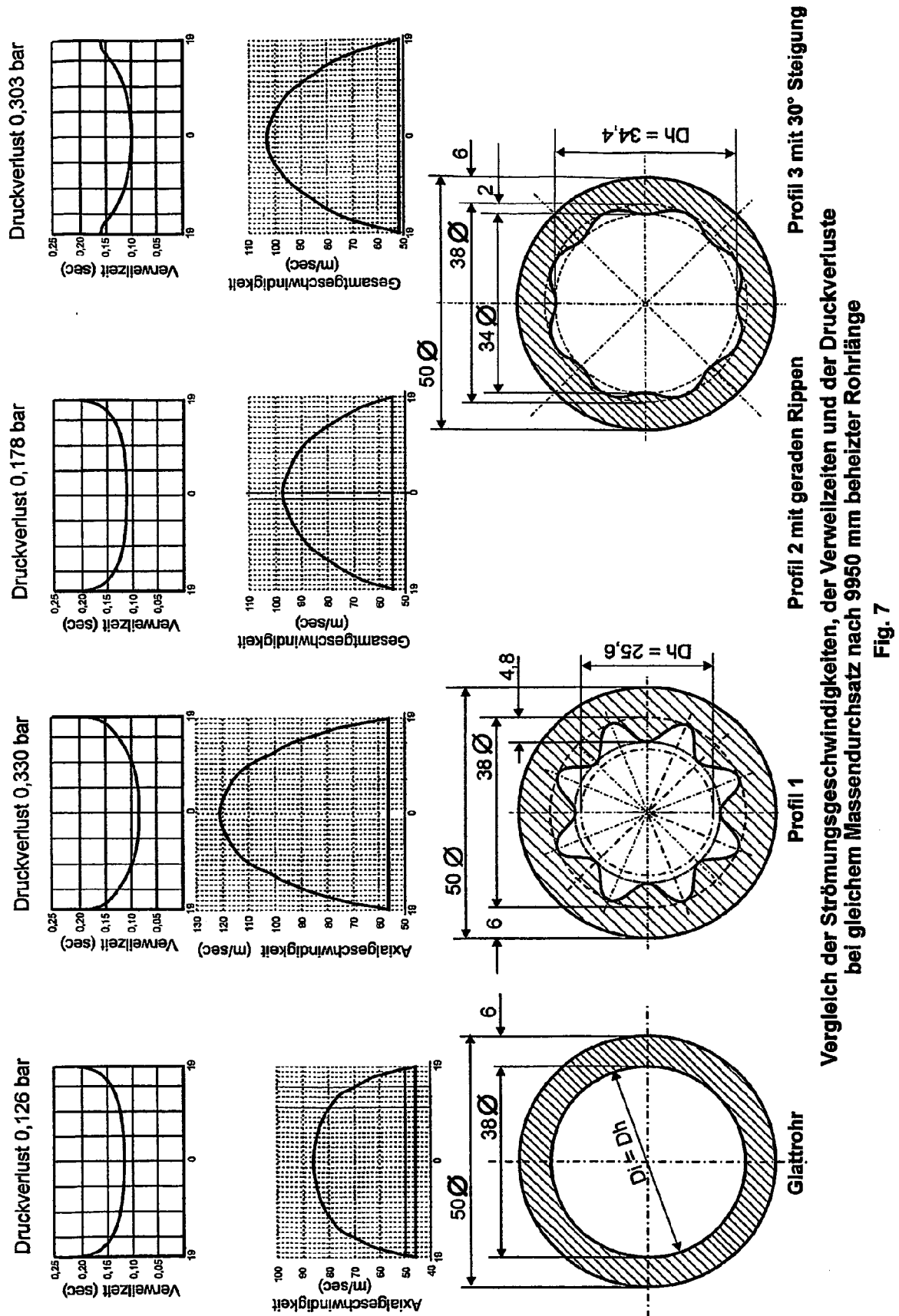
Temperaturverteilung auf der Rohrinnenwand bei 9950 mm

Fig. 5



**Darstellung eines Profilsegmentes  
zur mathematischen Definition  
von Flankenwinkel ( $\beta$ ) und Profilradien ( $R$ )**

**Fig. 6**



**IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE**

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

**In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente**

- GB 969796 A [0005]
- EP 1136541 A1 [0005]
- US 5950718 A [0006]
- DE 19523280 [0040]