

"Rohr und Vorrichtung zum thermischen Spalten von Kohlenwasserstoffen"

Die Erfindung bezieht sich auf ein Rohr zum thermischen Spalten von Kohlenwasserstoffen in Anwesenheit von Dampf, bei dem das Einsatzgemisch durch außenbeheizte Rohre geführt wird. Ferner betrifft die Erfindung eine Vorrichtung zum thermischen Spalten von Kohlenwasserstoffen.

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 Nickel-Chrom-Eisen-Legierung mit hoher Oxidations- beziehungsweise Zunderbeständigkeit und hoher Aufkohlungsbeständigkeit geführt wird. Die Rohrschlangen bestehen aus vertikal oder horizontal verlaufenden geraden Rohrabschnitten, die über U-förmige Rohrbogen miteinander verbunden oder parallel zueinander angeordnet sind. Sie werden üblicherweise mit Hilfe von Seitenwand- und/oder 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.

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 Rohrinnenwand 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, umso stärker wächst die Schicht des Pyrolysekokes, deren isolierende Wirkung die Rohrwandtemperatur weiter steigen lässt. Obgleich die als Rohrwerkstoff zur Verwendung kommenden Nickel-Chrom-Eisen-Legierung 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 mm 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.

Um die Kohlenstoffablagerungen (Verkokung) an der Rohrinnenwand 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.

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 Glattrohr 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, bei

spielsweise einer elektrolytisch abtragenden Bearbeitung oder eines formgebenden Schweißverfahrens, um Innen-Rohre herzustellen.

5 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.

10 Aus EP 1 525 289 B9 ist ein Rippenrohr zum thermischen Spalten von Kohlenwasserstoffen bekannt, das bezogen auf die Rohrachse geneigte, wendelförmig verlaufende Innenrippen aufweist.

15 Aus WO 2010/043375 A1 ist eine Nickel-Chrom-Eisen-Legierung mit hoher Oxidations- und Aufkohlungsbeständigkeit, Zeitstandsfestigkeit und Kriechbeständigkeit aus 0,4% bis 0,6% Kohlenstoff, 28% bis 33% Chrom, 15% bis 25% Eisen, 2% bis 6% Aluminium, bis 2% Silizium, bis 2% Mangan, bis 1,5% Niob, bis 1,5% Tantal, bis 1,0% Wolfram, bis 1,0% Titan, bis 1,0% Zirkonium, bis 0,5% Yttrium, bis 0,5% Cer, bis 0,5% Molybdän, bis 0,1% Stickstoff, Rest Nickel einschließlich erschmelzungsbedingter Verunreinigungen bekannt.

20 Vor diesem Hintergrund liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, die Wirtschaftlichkeit des thermischen Spaltens von Kohlenwasserstoffen in Röhrenöfen mit außenbeheizten Rohren zu verbessern.

25 Diese Aufgabe wird durch die Gegenstände der Ansprüche 1, 2, 9 und 10 gelöst. Vorteilhafte Ausführungsformen sind in den Unteransprüchen und der hiernach folgenden Beschreibung wiedergegeben.

30 Es wurde erkannt, dass bei einem Rohr mit den Merkmalen des Oberbegriffs des Anspruchs 1 eine Beziehung zwischen den das Rohr charakterisierenden Merkmalen, nämlich

- der Anzahl N_T der in die Innenoberfläche des Rohres eingebrachten, sich wendelförmig um die Längsachse entlang der Innenoberfläche erstreckende Nuten,
- 35 • dem Durchmesser der Innenoberfläche, in die die Nuten eingebracht wurden, in einem Querschnitt senkrecht zur Längsachse,
- dem Radius r_2 des Nutgrunds der in dem Querschnitt senkrecht zur Längsachse in ihrem Nutgrund jeweils die Form eines Kreisbogens aufweisenden Nuten und
- 40 • der Nuttiefe TT der Nuten, die in dem Querschnitt senkrecht zur Längsachse jeweils dem kleinsten Abstand zwischen dem Kreis mit dem Durch-

messer D_i , auf dem die Innenoberfläche liegt und dessen Mittelpunkt auf der Längsachse liegt, und dem entferntesten Punkt des Nutgrunds der Nut von der Längsachse entspricht,

5 besteht, bei deren Berücksichtigung die Wirtschaftlichkeit des thermischen Spaltens von Kohlenwasserstoffen in Röhrenöfen mit außenbeheizten Rohren verbessert werden kann.

10 Es wurde nämlich erkannt, dass sich ein auf Wärmeübergangs-Überlegungen basierender Kennwert erarbeiten lässt, der sich auf zwei unterschiedlichen, aber jeweils allein von den vorstehend beschriebenen, das Rohr charakterisierenden Merkmalen abhängenden Wegen berechnen lässt.

15 Nach einer ersten Wärmeübergangs-Überlegung lässt sich dieser Kennwert als

$$P1 * |D_{\ddot{A}qv}|^2 + P2 * |D_{\ddot{A}qv}| + P3$$

20 ausdrücken, mit den Konstanten P1, P2 und P3 sowie dem Zahlenwert $|D_{\ddot{A}qv}|$ des von dem in mm gemessenen Innendurchmesser D_i abhängigen Äquivalenzdurchmessers $D_{\ddot{A}qv}$.

25 Gute Ergebnisse werden erreicht, wenn als Konstante P1 eine Zahl aus dem beanspruchten Bereich von -0,2 bis -0,3 gewählt wird. In einer bevorzugten Ausführungsform wird die Konstante P1 aus einem Bereich von -0,25 bis -0,295, insbesondere bevorzugt aus einem Bereich von -0,287 bis -0,2655 ausgewählt. Insbesondere bevorzugt ist die Konstante P1 gleich -0,287 oder -0,2655.

30 Gute Ergebnisse werden erreicht, wenn als Konstante P2 eine Zahl aus dem beanspruchten Bereich von 310 bis 315 gewählt wird. In einer bevorzugten Ausführungsform wird die Konstante P2 aus einem Bereich von 310 bis 312, insbesondere bevorzugt aus einem Bereich von 310,42 bis 311,31 ausgewählt. Insbesondere bevorzugt ist die Konstante P2 gleich 310,42 oder 311,31.

35 Gute Ergebnisse werden erreicht, wenn als Konstante P3 eine Zahl aus dem beanspruchten Bereich von 200 bis 1500 gewählt wird. In einer bevorzugten Ausführungsform wird die Konstante P3 aus einem Bereich von 230 bis 1400, insbesondere bevorzugt aus einem Bereich von 261,21 bis 1076 ausgewählt. Insbesondere bevorzugt ist die Konstante P3 gleich 261,21 oder 1076.

40 Der für die Gestaltung des Rohrs gemäß der Erfindung eingesetzte Kennwert wird in der vorgenannten Beziehung in Abhängigkeit des Zahlenwerts $|D_{\ddot{A}qv}|$ des von dem in

mm gemessenen Innendurchmesser D_i abhängigen Äquivalenzdurchmessers $D_{\text{Äqv}}$ ausgedrückt. Unter dem Begriff "Zahlenwert" wird in diesem Kontext und in den übrigen Unterlagen die dimensionslose Zahl eines sich aus dem Zahlenwert und der Maßeinheit zusammensetzenden Werts einer physikalischen Größe verstanden. Eine physikalische Größe ist eine quantitative bestimmbare Eigenschaft eines physikalischen Objektes, Vorgangs oder Zustands. Ihr Wert (Größenwert) wird als Produkt aus einem Zahlenwert (der Maßzahl) und einer Maßeinheit angegeben. Da die für die Gestaltung des Rohrs gemäß der Erfindung eingesetzten Beziehungen dimensionslos sind, wird auf den Zahlenwert der physikalischen Größen zurückgegriffen. Um dies zu verdeutlichen, wird in der Beschreibung und den Ansprüchen der Zahlenwert einer Größe mit der sonst häufig auf für die Darstellung eines Betrags verwendeten Nomenklatur dargestellt, beispielsweise als $|D_{\text{Äqv}}|$. Die Darstellung einer Variablen zwischen zwei horizontalen Strichen, wie beispielsweise $|D_{\text{Äqv}}|$ wird im Kontext dieser Beschreibung und der Ansprüche als Darstellung des Zahlenwertes des durch die Variable ausgedrückten Werts (Größenwerts) einer physikalischen Größe verstanden. Der Zahlenwert $|D_i|$ eines in mm gemessenen Durchmessers D_i von 70 mm ist beispielsweise die Zahl 70.

Der für die Gestaltung des Rohrs gemäß der Erfindung eingesetzte Kennwert wird in der vorgenannten Beziehung in Abhängigkeit des Zahlenwerts $|D_{\text{Äqv}}|$ des von dem in mm gemessenen Innendurchmesser D_i abhängigen Äquivalenzdurchmessers $D_{\text{Äqv}}$ ausgedrückt. Der Äquivalenzdurchmesser ist dabei der Durchmesser der Innenoberfläche, die ein glattes, nicht mit Nuten versehenes Rohr hätte, dessen Durchtrittsfläche der Durchtrittsfläche des erfindungsgemäßen Rohres entspricht. Als Durchtrittsfläche wird in einem Querschnitt senkrecht zur Längsachse die freie Fläche innerhalb des Rohres verstanden. Es hat sich gezeigt, dass wärmeübergangsbezogene Überlegungen häufig einfacher an einem Glattrohr vollzogen werden können. Außerdem hat sich gezeigt, dass Anwender des erfindungsgemäßen Rohres häufig in ihren Vorrichtungen zum thermischen Spalten von Kohlenwasserstoffen in Anwesenheit von Dampf, bei dem das Einsatzgemisch durch außenbeheizte Rohre geführt wird, in der Vergangenheit mit Glattrohren gearbeitet haben. Für die Umstellung auf die erfindungsgemäßen Rohre ist es deshalb eingänglicher, wenn ein Vergleich zu dem durchtrittsflächenentsprechenden Glattrohr hergestellt werden kann.

Der Äquivalenzdurchmesser $D_{\text{Äqv}}$ ergibt sich über die Beziehung $D_{\text{Äqv}} = 2 r_{\text{Äqv}}$ aus dem Radius der Innenoberfläche, den ein glattes, nicht mit Nuten versehenes Rohr hätte, dessen Durchtrittsfläche der Durchtrittsfläche des erfindungsgemäßen Rohres entspricht. Setzt man die Durchtrittsfläche $A_{\text{Äqv}}$ des Glattrohres ($A_{\text{Äqv}} = \pi (r_{\text{Äqv}})^2$) der Durchtrittsfläche des erfindungsgemäßen Rohres gleich, so lässt sich die Durchtrittsfläche $A_{\text{Äqv}}$ des Glattrohres wie folgt in den das Rohr charakterisierenden Merkmalen aus-

- 6 -

drücken (die verwendeten Symbole beziehen sich auf eine Nomenklatur, wie sie beispielhaft auch in der Fig. 5 erläutert wird):

$$|r_{\ddot{A}qv}| = \left| \sqrt{\frac{|A_{\ddot{A}qv}|}{\pi}} \right|$$

$$A_{\ddot{A}qv} = A_1 + N_T \cdot A_T$$

$$A_1 = \pi \cdot |r_1|^2$$

$$A_T = \left[|r_2| \cdot \frac{b_2}{2} - \frac{s \cdot (|r_2| - (|TT| + h))}{2} \right] - \left[|r_1| \cdot \frac{b_1}{2} - \frac{s \cdot (|r_1| - h)}{2} \right]$$

10

$$b_1 = 2 \cdot |r_1| \cdot \arcsin \left(\frac{\left| \sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)}} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2} \right|}{|r_1|} \right)$$

15

$$b_2 = 2 \cdot |r_2| \cdot \arcsin \left(\frac{\left| \sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)}} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2} \right|}{|r_2|} \right)$$

$$s = 2 \cdot \left| \sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)}} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2 \right|$$

$$h = \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)}$$

20

Die der Durchtrittsfläche $A_{\ddot{A}qv}$ des Glattröhres gleichgesetzte Durchtrittsfläche des erfindungsgemäßen Rohres setzt sich zusammen aus der durch die Innenoberfläche, in die

die Nuten eingebracht wurden, begrenzten Durchtrittsfläche A_1 , die sich aus dem Radius der Innenoberfläche leicht mit $A_1 = \pi r_1^2$ bestimmen lässt, und den zusätzlichen Flächen, die durch die Anzahl von N_T Nuten mit ihren jeweiligen Durchtrittsflächen A_T bereitgestellt werden.

5

Nach Auflösung der vorgenannten Beziehung lässt sich die der Durchtrittsfläche $A_{\text{Äqv}}$ des Glattrohres gleichgesetzte Durchtrittsfläche des erfindungsgemäßen Rohres somit wie folgt ausschließlich mit den das Rohr charakterisierenden Merkmalen ausdrücken (nachstehend auch mit Formel (1) in Bezug genommen):

- 8 -

$$\begin{aligned}
A_{\ddot{A}qv} = & \pi \cdot |r_1|^2 + N_T \\
& \cdot \left[\left[|r_2|^2 \right. \right. \\
& \cdot \arcsin \left(\frac{\left| \sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2} \right|}{|r_2|} \right) \\
& - \left| \sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2} \right| \\
& \cdot \left(|r_2| - \left(|TT| + \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right) \right) \left. \right] \\
& - \left[|r_1|^2 \right. \\
& \cdot \arcsin \left(\frac{\left| \sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2} \right|}{|r_1|} \right) \\
& - \left| \sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2} \right| \\
& \cdot \left(|r_1| - \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right) \left. \right] \left. \right]
\end{aligned}$$

Nach einer zweiten Wärmeübergangs-Überlegung lässt sich dieser Kennwert als

- 9 -

$$\begin{aligned}
& C1 + C2 * |TT| + C3 * VD + C4 * |D_{\text{Äqv}}| \\
& + (|TT| - C5) * (VD - C6) * C7 \\
& + (|TT| - C5) * (|D_{\text{Äqv}}| - C8) * C9
\end{aligned}$$

5

oder unter Berücksichtigung weiterer Querverknüpfungen als

$$\begin{aligned}
& C1 + C2 * |TT| + C3 * VD + C4 * |D_{\text{Äqv}}| \\
& + (|TT| - C5) * (VD - C6) * C7 \\
& + (|TT| - C5) * (|D_{\text{Äqv}}| - C8) * C9 \\
& + (VD - C6) * (|D_{\text{Äqv}}| - C8) * C10 \\
& + (|D_{\text{Äqv}}| - C8) * (|D_{\text{Äqv}}| - C8) * C11
\end{aligned}$$

10

15

in Abhängigkeit des Zahlenwerts $|D_{\text{Äqv}}|$ des von dem in mm gemessenen Innendurchmesser D_i abhängigen Äquivalenzdurchmessers $D_{\text{Äqv}}$, der Anzahl N_T der Nuten und dem Zahlenwert $|TT|$ der in mm gemessenen Nuttiefe TT der Nuten sowie die Nutdicke VD , die das Verhältnis der Nuten N_T des Rohres im Verhältnis zu der Referenzzahl N_{ref} der maximal auf der Innenoberfläche eines Rohres mit gleichem Äquivalenzdurchmesser $D_{\text{Äqv}}$ einbringbaren Nuten mit einer Nuttiefe $TT = 1,3$ mm in Prozent beschreibt, beschreiben. Die Konstanten werden dabei wie folgt festgelegt:

20

$$\begin{aligned}
C1 &= 1946,066 \\
C2 &= 302,378 \\
C3 &= -2,178 \\
C4 &= 266,002 \\
C5 &= 1,954 \\
C6 &= 50,495 \\
C7 &= -2,004 \\
C8 &= 79,732 \\
C9 &= -1,041 \\
C10 &= 0,04631 \\
C11 &= -0,26550
\end{aligned}$$

25

30

35

Es wurde erkannt, dass wenn man diese beiden Berechnungsmethoden für den Kennwert gleichsetzt, die Beziehung

$$\begin{aligned}
& P1 * |D_{\text{Äqv}}|^2 + P2 * |D_{\text{Äqv}}| + P3 \\
& = \\
& C1 + C2 * |TT| + C3 * VD + C4 * |D_{\text{Äqv}}| \\
& + (|TT| - C5) * (VD - C6) * C7 \\
& + (|TT| - C5) * (|D_{\text{Äqv}}| - C8) * C9
\end{aligned}$$

40

oder unter Berücksichtigung weiterer Querverknüpfungen die Beziehung

$$\begin{aligned}
 & P1 * |D_{\ddot{A}qv}|^2 + P2 * |D_{\ddot{A}qv}| + P3 \\
 = & C1 + C2 * |TT| + C3 * VD + C4 * |D_{\ddot{A}qv}| \\
 & + (|TT| - C5) * (VD - C6) * C7 \\
 & + (|TT| - C5) * (|D_{\ddot{A}qv}| - C8) * C9 \\
 & + (VD - C6) * (|D_{\ddot{A}qv}| - C8) * C10 \\
 & + (|D_{\ddot{A}qv}| - C8) * (|D_{\ddot{A}qv}| - C8) * C11
 \end{aligned}$$

als Beschreibung der Beziehung der das Rohr charakterisierenden Merkmale untereinander erhält, die ein Rohr charakterisieren, das die Wirtschaftlichkeit des thermischen Spaltens von Kohlenwasserstoffen in Röhrenöfen mit außenbeheizten Rohren verbessert. Die konkret für das Rohr zu verwendenden, das Rohr charakterisierenden Merkmale, nämlich

- die Anzahl N_T der in die Innenoberfläche des Rohres eingebrachten, sich wendelförmig um die Längsachse entlang der Innenoberfläche erstreckende Nuten,
- der Durchmesser der Innenoberfläche, in die die Nuten eingebracht wurden, in einem Querschnitt senkrecht zur Längsachse,
- der Radius r_2 des Nutgrunds der in dem Querschnitt senkrecht zur Längsachse in ihrem Nutgrund jeweils die Form eines Kreisbogens aufweisenden Nuten und
- die Nuttiefe TT der Nuten, die in dem Querschnitt senkrecht zur Längsachse jeweils dem kleinsten Abstand zwischen dem Kreis mit dem Durchmesser D_i , auf dem die Innenoberfläche liegt und dessen Mittelpunkt auf der Längsachse liegt, und dem entferntesten Punkt des Nutgrunds der Nut von der Längsachse entspricht,

lassen sich mit einfachen Iterationen auf Grundlage dieser Beziehung ermitteln. Jede Paarung dieser vier das Rohr charakterisierenden Merkmale, die diese Beziehung erfüllt, steht für ein Rohr, das die Wirtschaftlichkeit des thermischen Spaltens von Kohlenwasserstoffen in Röhrenöfen mit außenbeheizten Rohren verbessert.

In der Praxis stellt sich heraus, dass sich der Aufwand für die Iteration in der Praxis sogar noch weiter reduziert. So ergeben sich Festlegungen für einzelne der vier das Rohr charakterisierenden Merkmale aus Steifigkeits- oder Herstellungsbeschränkungen oder auch daraus, dass das Rohr mit einer bestimmten Durchtrittsfläche ausgeführt werden muss.

Über ein sich aus der Anlage, in der das Rohr eingesetzt werden soll, ergebendes mögliches Maximalgewicht des einzelnen Rohrs kann sich eine Beschränkung für die maximale Wandstärke des Rohres ergeben, die wiederum aus Steifigkeitsgesichtspunkten eine Beschränkung für die maximal darstellbare Nuttiefe TT ergibt. Beschränkungen für die Wandstärke (und damit für die maximal darstellbare Nuttiefe) können sich auch aus anderen Aspekten, beispielsweise aus dem zu erreichenden Wärmeübergang, ergeben.

Steifigkeitserwägungen können auch eine Obergrenze für die Anzahl N_T der in die Innenoberfläche des Rohres eingebrachten, sich wendelförmig um die Längsachse entlang der Innenoberfläche erstreckenden Nuten in Kombination mit der Nuttiefe TT ergeben. Werden zu viele, zu tiefe Nuten eingebracht, kann die Steifigkeit des Rohres zu stark geschwächt werden.

Auch können sich aus der Neigung des Rohres, beim thermischen Spalten von Kohlenwasserstoffen in Anwesenheit von Dampf, bei dem das Einsatzgemisch durch die außenbeheizten Rohre geführt wird, zu verkoken, Grenzen hinsichtlich des Radius r_2 des Kreisbogens des Nutgrunds in Kombination mit der Nuttiefe TT ergeben.

Ferner ergeben sich aus Herstellungsaspekten Beschränkungen, beispielsweise hinsichtlich des Radius r_2 des Kreisbogens des Nutgrunds in Kombination mit der Nuttiefe TT. Die Nuten können beispielsweise in einem Tieflochbohrverfahren, beispielsweise nach Art in der auf die Anmelderin angemeldeten, noch nicht veröffentlichten deutschen Patentanmeldung mit dem Aktenzeichen 10 2016 012 907.7 beschriebenen Weise hergestellt werden. Dabei kommen Wendeschneidplatten zur Herstellung der Nuten zum Einsatz. Diese Wendeschneidplatten sind in festgelegten Größen erhältlich. Greift man – was sich aus Wirtschaftlichkeitsgründen empfiehlt – auf die bereits erhältlichen Wendeschneidplatten zurück und verzichtet auf die – ebenfalls denkbare – Möglichkeit, Wendeschneidplatten spezifisch für die Herstellung des konkreten Rohres anfertigen zu lassen, so ergeben sich auch hieraus Festlegungen für den Radius r_2 des Kreisbogens des Nutgrunds in Kombination mit der Nuttiefe TT. Auch kann sich herausstellen, dass sich ein Rohr mit einer ersten Anzahl von Nuten rascher und deutlich kostengünstiger herstellen lässt, als ein Rohr mit einer zweiten, im Verhältnis zu ersten Anzahl größeren Anzahl von Nuten, so dass sich auch hieraus eine Beschränkung für die Anzahl der einzubringenden Nuten ergibt.

Auch können sich Beschränkungen dadurch ergeben, dass für das Rohr ein gewisser Durchsatz an Einsatzgemisch gefordert wird und mithin eine minimale Durchtrittsfläche des Rohrs.

Im Ergebnis werden sich vor dem Durchführen der Iteration bereits Bereiche ergeben, in denen einzelne der vier das Rohr charakterisierenden Merkmale nicht liegen können und diese bei der Iteration somit ausgeschlossen werden können.

5 Die vorstehend beschriebene Beziehung

$$\begin{aligned} & C1 + C2 * |TT| + C3 * VD + C4 * |D_{\ddot{A}qv}| \\ & + (|TT| - C5) * (VD - C6) * C7 \\ & + (|TT| - C5) * (|D_{\ddot{A}qv}| - C8) * C9 \end{aligned}$$

10

bzw. die weitere Querverknüpfungen berücksichtigende Beziehung

$$\begin{aligned} & C1 + C2 * |TT| + C3 * VD + C4 * |D_{\ddot{A}qv}| \\ & + (|TT| - C5) * (VD - C6) * C7 \\ & + (|TT| - C5) * (|D_{\ddot{A}qv}| - C8) * C9 \\ & + (VD - C6) * (|D_{\ddot{A}qv}| - C8) * C10 \\ & + (|D_{\ddot{A}qv}| - C8) * (|D_{\ddot{A}qv}| - C8) * C11 \end{aligned}$$

15

20 greifen auf die Nutdichte VD zurück. Die Nutdichte VD ist das Verhältnis der Nuten N_T des Rohres im Verhältnis zu der Referenzzahl N_{ref} der maximal auf der Innenoberfläche eines Rohres mit gleichem Äquivalenzdurchmessers $D_{\ddot{A}qv}$ einbringbaren Nuten mit einer Nuttiefe $TT = 1,3$ mm in Prozent.

25

Die erfindungsgemäße Erkenntnis lässt sich für Rohre mit einem breiten Spektrum von Durchmessern D_i der Innenoberfläche, in die die Nuten eingebracht werden, anwenden. Offensichtlich lassen sich mehr Nuten mit festgelegtem Radius r_2 des Kreisbogens im Nutgrund der Nut und festgelegter Nuttiefe TT in ein Rohr mit größerem Durchmesser D_i als in ein Rohr mit kleinerem Durchmesser D_i einbringen. Um dennoch eine Beziehung für alle Durchmesser angeben zu können, wurde eine Normierung entwickelt, bei der nicht mehr die tatsächliche Anzahl der Nuten N_T in die Beziehung eingesetzt wird, sondern die Nutdichte VD.

30

Die Nutdichte VD ergibt sich – da sie in Prozent ausgedrückt wird – aus der Beziehung

35

$$VD = N_T / N_{ref} * 100$$

Wobei die Referenzzahl N_{ref} die größte natürliche Zahl ist, bei der die Beziehung

- 13 -

$$N_{ref} \leq \frac{\pi}{\arcsin \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_{\ddot{A}qv}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{\ddot{A}qv}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{\ddot{A}qv}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2}}{|r_{\ddot{A}qv}|}} \right)}$$

erfüllt ist, wobei $A_{\ddot{A}qv}$ der aus der Formel (1) berechnete Äquivalenzdurchmesser ist und wobei

$$|r_{\ddot{A}qv}| = \left| \sqrt{\frac{|A_{\ddot{A}qv}|}{\pi}} \right|$$

5

und bei der es zugleich möglich ist, ein iterativ zu bestimmendes r_{Nref} zu finden, das unter Rückgriff auf den mit der Formel (1) berechneten Äquivalenzdurchmesser $A_{\ddot{A}qv}$ die folgenden Beziehungen erfüllt (nachfolgend auch mit Formel (2) bezeichnet):

- 14 -

$$\begin{aligned}
& A_{\ddot{A}qv} \\
&= \pi \cdot |r_{Nref}|^2 + N_{ref} \\
&\cdot \left[\begin{aligned} & |r_2|^2 \\ & \cdot \arcsin \left(\frac{\left| \sqrt{2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2} \right|}{|r_2|} \right) \\ & - \left| \sqrt{2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2} \right| \\ & \cdot \left(|r_2| - \left(1,3 + \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right) \right) \end{aligned} \right] \\
&\cdot \left[\begin{aligned} & - |r_{Nref}|^2 \\ & \cdot \arcsin \left(\frac{\left| \sqrt{2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2} \right|}{|r_1|} \right) \end{aligned} \right]
\end{aligned}$$

- 15 -

$$- \left[\sqrt{2 \cdot |r_{N_{ref}}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{N_{ref}}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{N_{ref}}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2} \right] \cdot \left(|r_{N_{ref}}| - \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{N_{ref}}| - |r_2| + 1,3)} \right) \right]$$

mit den Nebenbedingungen

$$\pi \geq N_{ref} \cdot \arcsin \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_{N_{ref}}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{N_{ref}}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{N_{ref}}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2}}{|r_{N_{ref}}|} \right), r_{N_{ref}} < r_{\Delta qv}$$

5

N_{ref} lässt sich leicht durch folgende Schrittabfolge bestimmen:

In einem ersten Schritt wird die rechte Seite der Beziehung

$$N_{ref} \leq \frac{\pi}{\arcsin \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_{\Delta qv}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{\Delta qv}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{\Delta qv}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2}}{|r_{\Delta qv}|} \right)}$$

10

mit den Werten des Rohres ausrechnet, zu dem es zu prüfen gilt, ob es die erfindungsgemäßen Vorteile realisiert. Da N_{ref} eine natürlich Zahl sein muß, wird die natürlich Zahl genommen, die dem errechneten Wert entspricht, wenn der errechnete Wert eine natürliche Zahl ist oder die nächst kleinere natürliche Zahl zu dem errechneten Wert. Als Beispiel sei hier ein Rohr mit $D_i = 60$ mm, $TT = 2,05$ mm, $r_2 = 8$ mm und $N_T = 8$ genommen. Damit ergibt sich für $N_{ref} \leq 19,4967769$. Damit wird N_{ref} in dem ersten Schritt als 19 angenommen.

15

20

In einem zweiten Schritt wird geprüft, ob sich mit dem im ersten Schritt gefundenen N_{ref} ein $r_{N_{ref}}$ finden lässt, mit dem unter Rückgriff auf den mit der Formel (1) berechneten

Äquivalenzdurchmesser $A_{\ddot{A}qv}$ die Formel (2) erfüllt werden kann, ohne die Nebenbedingung

$$\pi \geq N_{ref} \cdot \arcsin \left(\frac{\sqrt{\left| 2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2 \right|}}{|r_{Nref}|} \right), r_{Nref} < r_{\ddot{A}qv}$$

5

zu verletzen. $A_{\ddot{A}qv}$ wird mit den Werten des Rohres ausgerechnet, zu dem es zu prüfen gilt, ob es die erfindungsgemäßen Vorteile realisiert, mit der Formel (1) berechnet. Bei den vorgenannten Beispielswerten ($D_i = 60$ mm, $TT = 2,05$ mm, $r_2 = 8$ mm und $N_T = 8$) ergibt sich ein $A_{\ddot{A}qv}$ von 2963,77397 mm² bei den genannten Beispielswerten. Mithin wird im zweiten Schritt der Suche nach N_{ref} geprüft, ob sich mit dem im ersten Schritt gefundenen N_{ref} ein r_{Nref} finden lässt, dass mit dem so errechneten $A_{\ddot{A}qv}$ die Formel (2) erfüllt und zugleich die genannten Nebenbedingungen erfüllt werden.

10

15

20

Diese Iteration lässt sich leicht mit einem Tabellenprogramm, beispielsweise dem Programm Microsoft® Excel und der in solchen Tabellenprogrammen vorgesehenen Zielwertsuche durchführen. Man nimmt eine zunächst leere erste Zelle, die nachher bei der Funktion der Zielwertsuche als "Veränderbare Zelle" genommen wird. Diese Zelle füllt man mit einem beliebigen Zahlenwert, beispielsweise $|r_1|$. Dann gibt man in eine zweite Zelle die vorstehend genannte Gleichung für $A_{\ddot{A}qv}$, die $A_{\ddot{A}qv}$ in r_{Nref} ausdrückt, wobei für r_{Nref} auf die mit einem beliebigen Zahlenwert, beispielsweise $|r_1|$ gefüllte erste Zelle verwiesen wird und der Wert für r_2 aus den Kenndaten des Rohres genommen wird, zu dem es zu prüfen gilt, ob es die erfindungsgemäßen Vorteile realisiert.

25

In einer dritten Zelle gibt man die Gleichung " $= A_{\ddot{A}qv} - \text{Wert der zweiten Zelle}$ " ein, wobei hier das $A_{\ddot{A}qv}$ mit der Formel (1) berechnet wird.

In einer vierten Zelle gibt man die Gleichung ein

$$= \pi - N_{ref} \cdot \arcsin \left(\frac{\sqrt{\left| 2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2 \right|}}{|r_{Nref}|} \right)$$

Wobei r_{Nref} auf die mit einem beliebigen Zahlenwert, beispielsweise $|r_1|$ gefüllte erste Zelle verweist und der Wert für r_2 aus den Kenndaten des Rohres genommen wird, zu dem es zu prüfen gilt, ob es die erfindungsgemäßen Vorteile realisiert. In einer fünften Zelle fügt man eine WENN-DANN-Prüfung (If-then-test) ein, die das Wort "FALSCH" ausgibt, wenn der Wert in der vierten Zelle kleiner Null ist und sonst das Wort "WAHR" ausgibt.

Mit dem so vorbereiteten Tabellenblatt kann man dann die in dem Tabellenprogramm vorgesehene Zielwertsuche starten. Die Zielwertsuche fragt, welches die Zielzelle ist. Hierfür gibt man die dritte Zelle an. Ferner fragt die Zielwertsuche nach dem Zielwert. Diesen gibt man als 0 (null) an. Ferner fragt die Zielwertsuche nach der veränderbaren Zelle. Hierfür gibt man die erste Zelle an. Die Zielwertsuche wird zu einem Wert in der ersten Zelle führen. Ist bei diesem Wert der Inhalt der fünften Zelle "WAHR", dann ist das im ersten Schritt gefundene N_{ref} das zu verwendende N_{ref} . Ist der Wert der fünften Zelle "FALSCH", so reduziert man das im ersten Schritt gefundene N_{ref} um die Zahl 1 und bildet damit ein neues N_{ref} , mit dem man den zweiten Schritt erneut durchführt. In der Regel ergibt dies bereits am Ende der Zielwertsuche einen Wert in der ersten Zelle, zu dem auch in der fünften Zelle das Wort "WAHR" steht, so dass das so gewonnene neue N_{ref} das zu verwendende N_{ref} ist. Anderfalls reduziert man das neue N_{ref} abermals um die Zahl 1 und führt den zweiten Schritt abermals durch. Es hat sich gezeigt, dass selbst wenn eine solche Zielwertsuche in einem Tabellenprogramm in den hinteren Nachkommastellen nicht perfekt ist, dies auch aufgrund der übrigen Toleranzen keinen merklichen Einfluss auf die Auslegung hat.

Mit dem so gefundenen N_{ref} lässt sich für das Rohr, zu dem es zu prüfen gilt, ob es die erfindungsgemäßen Vorteile realisiert, die Nutzdichte VD aus $VD = 100 \cdot N_T / N_{\text{ref}}$ bestimmen. Ergibt sich mit den so gewonnen Werten, dass

$$\begin{aligned}
 & P1 \cdot |D_{\text{Äqv}}|^2 + P2 \cdot |D_{\text{Äqv}}| + P3 \\
 = & \\
 & C1 + C2 \cdot |TT| + C3 \cdot VD + C4 \cdot |D_{\text{Äqv}}| \\
 & + (|TT| - C5) \cdot (VD - C6) \cdot C7 \\
 & + (|TT| - C5) \cdot (|D_{\text{Äqv}}| - C8) \cdot C9
 \end{aligned}$$

oder unter Berücksichtigung weiterer Querverknüpfungen dass

$$\begin{aligned}
 & P1 \cdot |D_{\text{Äqv}}|^2 + P2 \cdot |D_{\text{Äqv}}| + P3 \\
 = & \\
 & C1 + C2 \cdot |TT| + C3 \cdot VD + C4 \cdot |D_{\text{Äqv}}| \\
 & + (|TT| - C5) \cdot (VD - C6) \cdot C7 \\
 & + (|TT| - C5) \cdot (|D_{\text{Äqv}}| - C8) \cdot C9
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + (VD - C6) * (|D_{\text{Äqv}}| - C8) * C10 \\
& + (|D_{\text{Äqv}}| - C8) * (|D_{\text{Äqv}}| - C8) * C11
\end{aligned}$$

5 dann liegt die Bestätigung vor, dass das Rohr mit diesen der Berechnung zugrunde gelegten vier das Rohr charakterisierenden Merkmale (N_T , D_i , r_2 , TT) die Wirtschaftlichkeit des thermischen Spaltens von Kohlenwasserstoffen in Röhrenöfen mit außen-beheizten Rohren verbessert.

10 Bei den oben genannten Beispielswerten ($D_i = 60$ mm, $TT = 2,05$ mm, $r_2 = 8$ mm und $N_T = 8$) ergibt sich im ersten Schritt ein N_{ref} von 19. Im zweiten Schritt ergibt die Zielwertsuche mit N_{ref} von 19 ein $r_{N_{\text{ref}}}$ von 29,4509992. In der vierten Zelle ergibt sich jedoch der Wert -0,07096658, so dass in der fünften Zelle das Wort "FALSCH" ausgeworfen wird. Reduziert man das N_{ref} von 19 um die Zahl 1 auf 18 und führt den zweiten Schritt erneut durch, so ergibt die Zielwertsuche mit N_{ref} von 18 ein $r_{N_{\text{ref}}}$ von
15 29,5192908. In der vierten Zelle ergibt sich jedoch der Wert 0,10620948, so dass in der fünften Zelle das Wort "WAHR" ausgeworfen wird. $N_{\text{ref}} = 18$ wäre bei der weiteren Prüfung des Rohrs auf Zugehörigkeit zu der Erfindung für die Berechnung der Nutdichte VD zu verwenden.

20 Das erfindungsgemäße Rohr erstreckt sich entlang einer Längsachse und weist in seine Innenoberfläche eingebrachte Nuten auf. Die Anzahl der vorhandenen Nuten wird durch die Variable N_T ausgedrückt. Die Nuten erstrecken sich wendelförmig um die Längsachse entlang der Innenoberfläche des Rohres. In einer bevorzugten Ausführungsform sind die Nuten gleichmäßig über den Umfang des Rohres verteilt. Damit ist
25 gemeint, dass in einem Querschnitt senkrecht zur Längsachse für alle Nuten der Abstand in Umfangsrichtung zwischen zwei benachbart angeordneten Nuten für alle Nuten gleich ist.

30 Die Nuttiefe wird als der Abstand des tiefsten Punkts der Nut von der Innenoberfläche verstanden. Damit ist in einem Querschnitt senkrecht zur Längsachse der kürzeste Abstand zwischen dem in Radialrichtung von der Längsachse gesehen entferntesten Punkt (tiefsten Punkt) der Nut und einem Innenoberflächenkreis um die Längsachse gemeint, auf dem die am weitesten nach innen angeordneten, zwischen den Nuten verbleibenden Teile der Innenoberfläche liegen. Es sind Ausführungen der Erfindung
35 vorgesehen, bei denen die Innenoberfläche des Rohrs zylinderförmig ist und in diese zylinderförmige Innenoberfläche die Nuten eingebracht werden. Zwischen den Nuten verbleiben dann Teile der Innenoberfläche, die Teile eines Zylinders bilden. Der Innenoberflächenkreis, auf dem die am weitesten nach innen angeordneten Teile der Innenoberfläche liegen, ist – da in dieser Ausführungsform alle verbleibenden Teile der Innenoberfläche gleich weit nach innen angeordnet sind – der Kreis in dem Querschnitt, auf dem die verbleibenden Teile der zylinderförmigen Innenoberfläche liegen.
40

Es sind aber auch Ausführungsformen vorgesehen, bei denen die zwischen zwei Nuten verbleibende Innenoberfläche nahezu bis auf eine Linie schrumpft, weil der Nutmund (der Öffnungsquerschnitt der Nut in der Innenoberfläche) sehr groß gewählt wird. Insbesondere wenn sich bei einer solchen Ausführungsform die Krümmung der Oberfläche der Nut von einer konkaven Krümmung im Nutgrund (einem Kreisbogen im Nutgrund) in eine konvexe Krümmung der Oberfläche der Nut im Bereich des Nutmunds ändert, können derartige Ausführungsformen so wirken, als würden sich in Umfangsrichtung an Nuten (wobei damit dann der konvex gekrümmte Bereich der Nut gemeint wäre) zwischen den Nuten angeordnete Rippen (wobei damit dann der konkav gekrümmte Bereich der Nut gemeint ist) anschließen und die die Nut (besser: den konkav gekrümmten Nutgrund) begrenzende Wandung in eine Außenoberfläche der Rippe übergeht. Der Innenoberflächenkreis, auf dem ja die am weitesten nach innen angeordneten Teile der Innenoberfläche liegen, ist bei solchen Ausführungsformen der Kreis in dem Querschnitt, auf dem in diesem Querschnitt die Scheitelpunkte der "Rippen" liegen. Die Nuttiefe wird in der erfindungsgemäß gefundenen, das Rohr charakterisierenden Beziehung durch die Variable TT ausgedrückt.

Die Nuten haben in einer bevorzugten Ausführungsform in einem Querschnitt senkrecht zur Längsachse zumindest im Nutgrund einen gerundeten Querschnitt, der sich vorzugsweise durch einen Kreisbogen approximieren lässt oder einen Kreisbogen entspricht. Im Bereich des Nutmunds kann sich die Querschnittsgeometrie der Nut in einer bevorzugten Ausführungsform aufweiten, insbesondere durch eine Änderung von einer konkaven Querschnittsgeometrie im Nutgrund zu einer konvexen Querschnittsgeometrie im Bereich des Nutmunds. In einer alternativen Ausführungsform lässt sich in einem Querschnitt senkrecht zur Längsachse die Querschnittsgeometrie der gesamten Nut durch einen Kreisbogen approximieren oder entspricht einem Kreisbogen. Ebenso sind Ausführungsformen denkbar, bei denen die Nut in einem Querschnitt senkrecht zur Längsachse die Querschnittsgeometrie eines Teils eine Ellipse hat. In einer bevorzugten Ausführungsform bleibt die Form des Querschnitts einer Nut senkrecht zur Längsachse für alle Querschnitte senkrecht zur Längsachse gleich. In einer besonders bevorzugten Ausführungsform bleibt die Form und die Größe des Querschnitts einer Nut senkrecht zur Längsachse für alle Querschnitte senkrecht zur Längsachse gleich. In einer bevorzugten Ausführungsform haben alle Nuten des Rohrs in einem Querschnitt senkrecht zur Längsachse, vorzugsweise in allen Querschnitten senkrecht zur Längsachse die gleiche Form und insbesondere bevorzugt die gleiche Form und Größe. Haben die Nuten unterschiedliche Größen und insbesondere unterschiedliche Nuttiefen, so wird für die erfindungsgemäße, das Rohr charakterisierende Beziehung die Nuttiefe TT der tiefsten Nut verwendet.

In einer bevorzugten Ausführungsform ist ein Querschnitt des Rohres senkrecht zur Längsachse rotationssymmetrisch um die Längsachse. Damit ist gemeint, dass es

zumindest einen Winkel zwischen 0° und 360° gibt, um den der Querschnitt des Rohres durch Drehung um die Längsachse auf sich selber abgebildet werden kann.

5 In einer bevorzugten Ausführungsform ist ein Querschnitt des Rohres senkrecht zur Längsachse punktsymmetrisch um den Punkt, den die Längsachse in diesem Querschnitt einnimmt.

10 In einer bevorzugten Ausführungsform ist ein Querschnitt des Rohres senkrecht zur Längsachse spiegelsymmetrisch um eine in diesem Querschnitt liegende, senkrecht zur Längsachse verlaufenden Achse.

Das Rohr hat in einem Querschnitt senkrecht zur Längsachse einen Innendurchmesser, der mit der Variable D_i ausgedrückt wird. Der Innendurchmesser ist der Durchmesser des Innenoberflächenkreises, also des Kreises um die Längsachse, auf dem die am weitesten nach innen angeordneten, zwischen den Nuten verbleibenden Teile der Innenoberfläche liegen.

20 In einer bevorzugten Ausführungsform hat der Rohrquerschnitt auf der Innenseite einen Durchmesser D_i in einem Bereich von 15 mm bis 280 mm, insbesondere bevorzugt von 15 mm bis 180 mm, insbesondere bevorzugt von 20 mm bis 150 mm und insbesondere bevorzugt von 30 mm bis 140 mm.

25 In einer bevorzugten Ausführungsform liegt die Nuttiefe TT in einem Bereich von 0,1 mm bis 10 mm, insbesondere bevorzugt von 1,0 mm bis 7 mm und ganz besonders bevorzugt von 1,0 mm bis 4 mm.

30 In einer bevorzugten Ausführungsform liegt die Anzahl der Nuten N_T in einem Bereich von 1 bis 100, insbesondere bevorzugt von 2 bis 50 und ganz besonders bevorzugt von 2 bis 30.

In einer bevorzugten Ausführungsform liegt die Nutdicke VD in einem Bereich von 1% bis 347%, insbesondere bevorzugt von 2% bis 113% und ganz besonders bevorzugt von 10% bis 105%.

35 In einer bevorzugten Ausführungsform verlaufen die Nuten in einem Winkel von 20° bis 40° , vorzugsweise von $22,5^\circ$ bis $32,5^\circ$, bezogen auf die Längsachse.

40 In einer bevorzugten Ausführungsform ist in einem Querschnitt senkrecht zur Längsachse das von einem zwischen zwei Nuten angeordneten Teil der Innenoberfläche eingenommene Kreisbogensegment auf dem Innenoberflächenkreis größer als 1% des von dem Nutmund zumindest einer der an diesen Teil der Innenoberfläche angrenzenden

den Nuten eingenommenen Kreisbogensegment auf dem Innenoberflächenkreis, insbesondere größer als 2%, insbesondere größer als 5%, insbesondere größer als 10%, insbesondere größer als 30%, insbesondere größer als 50%, insbesondere größer als 70%. In einer bevorzugten Ausführungsform ist in einem Querschnitt das von dem zwischen zwei Nuten angeordneten Teil der Innenoberfläche eingenommene Kreisbogen-
5 segment auf dem Innenoberflächenkreis gleich oder größer als das von dem Nutmund zumindest einer der an diesen Teil der Innenoberfläche angrenzenden Nuten eingenommenen Kreisbogensegment auf dem Innenoberflächenkreis.

10 Eine erfindungsgemäße Vorrichtung zum thermischen Spalten von Kohlenwasserstoffen in Anwesenheit von Dampf, bei dem das Einsatzgemisch durch außenbeheizte Rohre geführt wird, hat mindestens ein erfindungsgemäßes Rohr.

Bei dem erfindungsgemäßen Rohr wird das über den Rohrumfang zwischen Sonnen- und Schattenseite zwangsläufig unterschiedliche Wärmeangebot in der Rohrwandung
15 und im Rohrrinnern 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 Koks. Außerdem ist die thermische Beanspruchung des Rohrwerkstoffs infolge des
20 Temperatenausgleichs zwischen Sonnen- und Schattenseite geringer, was zu einer Verlängerung der Lebensdauer führt. Schließlich kommt es bei dem erfindungsgemäßen Rohr auch zu einer Vergleichmäßigung der Temperatur über den Rohrquerschnitt mit der Folge einer besseren Olefinausbeute. Der Grund hierfür ist, dass es ohne den
25 erfindungsgemäßen radialen Temperatenausgleich im Rohrrinnern an der heißen Rohrwand zu einem Übercracken und in der Rohrmitte zu einem zu geringen Reaktionsumsatz kommen würde.

Das erfindungsgemäße Rohr lässt sich je nach Werkstoff beispielsweise aus einem Schleudergussrohr dadurch herstellen, dass die Enden eines Rohres mit achsparallelen Nuten gegeneinander verdreht werden, oder dass das Innenprofil durch Vorformen
30 eines Schleudergussrohrs, beispielsweise durch Warmschmieden, Warmziehen oder Kaltverformen über ein Profilwerkzeug, beispielsweise einen fliegenden Dorn oder einer Dornstange mit einem dem Innenprofil des Rohrs entsprechenden Außenprofil erzeugt wird.

35 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 Rohrs.

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

- 5 Als Rohrwerkstoff eignen sich für den Einsatz in Äthylenanlagen Nickel-Chrom-Eisen-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.
- 10 Insbesondere bevorzugt wird für das Rohr eine Nickel-Chrom-Eisen-Legierung mit hoher Oxidations- und Aufkohlungsbeständigkeit, Zeitstandfestigkeit und Kriechbeständigkeit aus
- 15 0,05% bis 0,6% Kohlenstoff
20% bis 50% Chrom
5% bis 40% Eisen
bis 6% Aluminium
bis 2% Silizium
bis 2% Mangan
- 20 bis 1,5% Niob
bis 1,5% Tantal
bis 6,0% Wolfram
bis 1,0% Titan
bis 1,0% Zirkonium
- 25 bis 0,5% Yttrium
bis 0,5% Cer
bis 0,5% Molybdän
bis 0,1% Stickstoff
Rest Nickel einschließlich erschmelzungsbedingter Verunreinigungen
- 30 verwendet.

- Die nachfolgende Tabelle zeigt mögliche Ausführungsformen der Erfindung an, die der erfindungsgemäßen vorgeschlagenen Beziehung entsprechen. Dabei wird in einer
- 35 Zeile für einen gewählten Innendurchmesser D_{Aqv} eine Paarung N_{TMax} und TT_{min} und VD_{max} für einen guten, aber im Verhältnis zu einer zweiten Paarung aus N_{TMin} und TT_{Max} und VD_{min} geringeren Wärmeübergang angegeben. Zusätzlich zeigt die Tabelle einen mit einem Simulationsprogramm abgeschätzten Wärmeübergang ($H_{min}(D_{Aqv}, TT_{min}, VD_{Max})$ [Watt]) für den geringeren Wärmeübergang; $H_{Max}(D_{Aqv}, TT_{max}, VD_{min})$ [Watt]) für den noch weiter verbesserten Wärmeübergang).
- 40

Nr.	$D_{\text{Äqv}}$	N_{Tmax}	VD_{max}	TT_{min}	$H_{\text{min}}(D_{\text{Äqv}}, TT_{\text{min}}, VD_{\text{max}})$ [Watt]
1	35	9	100	1.3	10831.95559
2	40	11	100	1.3	12288.96106
3	45	12	100	1.3	13732.69121
4	50	14	100	1.3	15163.14603
5	55	16	100	1.3	16580.32553
6	60	18	100	1.3	17984.2297
7	65	20	100	1.3	19374.85855
8	70	21	100	1.3	20752.21208
9	75	23	100	1.3	22116.29028
10	80	25	100	1.3	23467.09315
11	85	27	100	1.3	24804.62071
12	90	29	100	1.3	26128.87294
13	95	30	100	1.3	27439.84984
14	100	32	100	1.3	28737.55142
15	105	34	100	1.3	30021.97768
16	110	36	100	1.3	31293.12861
17	115	38	100	1.3	32551.00422
18	120	39	100	1.3	33795.6045
19	125	41	100	1.3	35026.92946
20	130	43	100	1.3	36244.9791
21	135	45	100	1.3	37449.75341
22	140	47	100	1.3	38641.25239
23	160	54	100	1.3	43274.4951
24	180	61	100	1.3	47695.33262
25	200	68	100	1.3	51903.76496
26	280	97	100	1.3	66613.44243

Nr.	$D_{\text{Äqv}}$	NT_{min}	VD_{min}	TT_{max}	$H_{\text{max}}(D_{\text{Äqv}}, TT_{\text{max}}, VD_{\text{min}})$ [Watt]
27	35	3	33.33333333	2.7	11564.65262
28	40	3	27.27272727	2.7	13032.35209
29	45	3	25	2.7	14463.96054
30	50	3	21.42857143	2.7	15887.80079
31	55	3	18.75	2.7	17292.40888
32	60	3	16.66666667	2.7	18679.77042
33	65	3	15	2.7	20051.07678
34	70	3	14.28571429	2.7	21404.40771
35	75	3	13.04347826	2.7	22746.18795
36	80	3	12	2.7	24073.38983

37	85	3	11.11111111	2.7	25386.30292
38	90	3	10.34482759	2.7	26685.1369
39	95	3	10	2.7	27969.09023
40	100	3	9.375	2.7	29240.37497
41	105	3	8.823529412	2.7	30497.91084
42	110	3	8.333333333	2.7	31741.77677
43	115	3	7.894736842	2.7	32972.03508
44	120	3	7.692307692	2.7	34188.38764
45	125	3	7.317073171	2.7	35391.6438
46	130	3	6.976744186	2.7	36581.40387
47	135	3	6.666666667	2.7	37757.6973
48	140	3	6.382978723	2.7	38920.54851
49	160	3	5.555555556	2.7	43437.89962
50	180	3	4.918032787	2.7	47741.49693
51	200	3	4.411764706	2.7	51831.75693
52	280	3	3.092783505	2.7	66063.32146

5

Es wurde erkannt, dass sich der zu erwartende Wärmeübergang sowohl für den guten, aber im Verhältnis zu dem weiter optimierten etwas geringeren Wert ($H_{\min}(D_{\text{Äqv}}, TT_{\min}, VD_{\text{Max}})$ [Watt]) als auch für den weiter optimierten Wert $H_{\text{Max}}(D_{\text{Äqv}}, TT_{\text{max}}, VD_{\min})$ [Watt]) unmittelbar proportional zum Innendurchmesser auftragen lässt, wie in der Fig. 4 gezeigt. Die nachstehende Tabelle zeigt die Werte der verschiedenen Variablen der erfindungsgemäß eingesetzten Beziehungen für die einzelnen Rohre. Der Kreisbogen im Nutgrund hatte einen Radius r_2 von 8 mm.

Nr.	$A_{\text{Äqv}}$	A_1	A_T	r_1	b_1	b_2	s	h
1	962.113	870.691	10.158	16.648	11.365	12.331	11.146	0.961
2	1256.637	1149.789	9.713	19.131	10.883	11.77	10.737	0.769
3	1590.431	1477.643	9.399	21.688	10.543	11.374	10.44	0.638
4	1963.495	1835.026	9.176	24.168	10.303	11.093	10.226	0.547
5	2375.829	2231.74	9.006	26.653	10.12	10.878	10.059	0.479
6	2827.433	2667.765	8.87	29.141	9.975	10.708	9.927	0.426
7	3318.307	3143.09	8.761	31.63	9.858	10.57	9.818	0.383
8	3848.451	3666.405	8.669	34.162	9.76	10.455	9.727	0.348
9	4417.865	4220.229	8.593	36.652	9.679	10.359	9.65	0.319
10	5026.548	4813.348	8.528	39.143	9.609	10.278	9.585	0.295
11	5674.502	5445.756	8.472	41.635	9.55	10.207	9.529	0.274
12	6361.725	6117.451	8.423	44.128	9.498	10.146	9.48	0.255
13	7088.218	6836.823	8.38	46.65	9.452	10.092	9.436	0.239
14	7853.982	7587.043	8.342	49.143	9.411	10.044	9.397	0.225

15	8659.015	8376.545	8.308	51.637	9.375	10.001	9.362	0.213
16	9503.318	9205.329	8.277	54.131	9.343	9.963	9.331	0.201
17	10386.891	10073.393	8.25	56.626	9.314	9.928	9.303	0.191
18	11309.734	10988.968	8.225	59.143	9.287	9.897	9.278	0.182
19	12271.846	11935.564	8.202	61.638	9.263	9.868	9.254	0.174
20	13273.229	12921.438	8.181	64.133	9.241	9.842	9.233	0.166
21	14313.882	13946.589	8.162	66.628	9.221	9.818	9.213	0.159
22	15393.804	15011.017	8.144	69.124	9.202	9.796	9.195	0.153
23	20106.193	19669.568	8.086	79.127	9.14	9.722	9.135	0.132
24	25446.9	24956.406	8.041	89.128	9.092	9.666	9.088	0.116
25	31415.927	30871.542	8.006	99.13	9.055	9.621	9.052	0.103
26	61575.216	60807.235	7.917	139.124	8.962	9.511	8.96	0.072
27	962.113	877.692	28.14	16.715	14.619	17.379	14.158	1.573
28	1256.637	1175.212	27.142	19.341	14.145	16.706	13.832	1.279
29	1590.431	1511.08	26.45	21.932	13.82	16.241	13.592	1.08
30	1963.495	1885.673	25.941	24.5	13.582	15.899	13.409	0.935
31	2375.829	2299.186	25.548	27.053	13.4	15.636	13.263	0.825
32	2827.433	2751.727	25.236	29.596	13.255	15.426	13.145	0.739
33	3318.307	3243.365	24.981	32.131	13.138	15.256	13.047	0.669
34	3848.451	3774.144	24.769	34.66	13.041	15.114	12.964	0.612
35	4417.865	4344.095	24.59	37.186	12.959	14.994	12.894	0.563
36	5026.548	4953.239	24.437	39.707	12.889	14.891	12.833	0.522
37	5674.502	5601.591	24.304	42.226	12.829	14.802	12.779	0.486
38	6361.725	6289.163	24.187	44.743	12.776	14.724	12.732	0.455
39	7088.218	7015.965	24.085	47.257	12.729	14.656	12.691	0.428
40	7853.982	7782.002	23.993	49.77	12.688	14.595	12.653	0.404
41	8659.015	8587.28	23.912	52.282	12.651	14.54	12.62	0.382
42	9503.318	9431.804	23.838	54.793	12.617	14.491	12.589	0.363
43	10386.891	10315.577	23.771	57.302	12.587	14.446	12.562	0.345
44	11309.734	11238.601	23.711	59.811	12.56	14.406	12.537	0.329
45	12271.846	12200.88	23.656	62.319	12.535	14.369	12.514	0.315
46	13273.229	13202.415	23.605	64.826	12.512	14.335	12.493	0.302
47	14313.882	14243.208	23.558	67.333	12.491	14.304	12.473	0.289
48	15393.804	15323.26	23.515	69.839	12.472	14.275	12.455	0.278
49	20106.193	20036.081	23.371	79.86	12.407	14.178	12.394	0.241
50	25446.9	25377.119	23.26	89.877	12.357	14.105	12.347	0.212
51	31415.927	31346.407	23.173	99.889	12.318	14.046	12.31	0.19
52	61575.216	61506.358	22.953	139.922	12.22	13.899	12.216	0.133

Bei der für die Abschätzung der Werte ($H_{\min}(D_{\text{Äqv}}, TT_{\min}, VD_{\text{Max}})$ [Watt]) und $H_{\text{Max}}(D_{\text{Äqv}}, TT_{\text{max}}, VD_{\min})$ [Watt]) eingesetzten CFD-Analyse (Computational Fluid Dynamics Analyse) wurden die folgenden Simulationsbedingungen verwendet:

- 5 Randbedingungen zur Simulation des Wärmeübergangs:
 Temperatur des Raumes zur Außenbeheizung der Rohre: 1300 °C
 Emissivität ϵ der Rohre: 0,85
 Berücksichtigung von Sonnen-/Schattenseiten (Sonnenseite: 80% Strahlung 20% Kon-
 10 vektion; Schattenseite: 20% Strahlung 80% Konvektion) sowie der physikalischen
 Werkstoffeigenschaften Dichte, spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit in
 Abhängigkeit der Temperatur
 Simulationslänge: 2 m

Tabelle 1: Zustand des Einsatzgemisches am Rohreinlass

Parameter	Wert
Temperatur, °C	621
Druck, bar	2
Flächenspezifischer Massestrom, g/(s·m ²)	52912,8

15

Tabelle 2: Physikalische Eigenschaften des Einsatzgemisches

Temperatur °C	Dichte kg/m ³	Spezifische Wärmekapazität kJ/kgK	dynamische Viskosität kg/ms	Wärmeleitfähigkeit W/mK
620	0.87467615	2.81553015	2.941481E-05	0.08947538
630	0.86669998	2.82698110	2.974235E-05	0.09122076
640	0.85872380	2.83843205	3.006989E-05	0.09296613
650	0.85074763	2.84988300	3.039743E-05	0.09471151
660	0.84277145	2.86133395	3.072497E-05	0.09645688
670	0.83479528	2.87278490	3.105251E-05	0.09820226
680	0.82681910	2.88423585	3.138005E-05	0.09994763
690	0.81884293	2.89568680	3.170759E-05	0.10169301
700	0.81086675	2.90713775	3.203513E-05	0.10343838
710	0.80289058	2.91858870	3.236268E-05	0.10518376
720	0.79491440	2.93003965	3.269022E-05	0.10692913
730	0.78693823	2.94149060	3.301776E-05	0.10867451
740	0.77896205	2.95294155	3.334530E-05	0.11041988
750	0.77098588	2.96439250	3.367284E-05	0.11216526
760	0.76300970	2.97584345	3.400038E-05	0.11391063
770	0.75503353	2.98729440	3.432792E-05	0.11565601
780	0.74705735	2.99874535	3.465546E-05	0.11740138
790	0.73908118	3.01019630	3.498300E-05	0.11914676
800	0.73110500	3.02164725	3.531055E-05	0.12089213
810	0.72312883	3.03309820	3.563809E-05	0.12263751
820	0.71515265	3.04454915	3.596563E-05	0.12438288

830	0.70717648	3.05600010	3.629317E-05	0.12612826
840	0.69920030	3.06745105	3.662071E-05	0.12787363
850	0.69122413	3.07890200	3.694825E-05	0.12961901

Das erfindungsgemäße Rohr wird vorzugsweise zum thermischen Spalten von Kohlenwasserstoffen in Anwesenheit von Dampf, bei dem das Einsatzgemisch durch außenbeheizte Rohre geführt wird, verwendet.

Nachfolgend wird die Erfindung anhand einer lediglich Ausführungsformen der Erfindung darstellenden Zeichnung näher erläutert. Darin zeigen:

- Fig. 1 eine perspektivische Ansicht eines erfindungsgemäßen Rohrs,
- Fig. 2 einen ersten möglichen Querschnitt eines erfindungsgemäßen Rohrs in einer Schnittebene senkrecht zur Längsachse des Rohres,
- Fig. 3 einen zweiten möglichen Querschnitt eines erfindungsgemäßen Rohrs in einer Schnittebene senkrecht zur Längsachse des Rohres,
- Fig. 4 ein Diagramm, dass für eine Paarung von zu guten Ergebnissen führenden Anzahlen N_T von Nuten und Nuttiefen TT und für eine Paarung von zu weiter verbesserten Ergebnissen führenden Anzahlen N_T von Nuten und Nuttiefen TT die Abhängigkeit des mit dieser Paarung erreichten Wärmeübergangs vom Innendurchmesser darstellt und
- Fig. 5 einen Querschnitt durch ein erfindungsgemäßes Rohr mit einer Nut.

Das in Fig. 1 dargestellt erfindungsgemäße Rohr 1 erstreckt sich entlang einer Längsachse A und hat eine Anzahl von 3 in die Innenoberfläche eingebrachte, sich wendelförmig um die Längsachse A entlang der Innenoberfläche erstreckende Nuten 2.

Bei dem in Fig. 2 dargestellten Querschnitt des erfindungsgemäßen Rohrs 1 ist zu erkennen, dass gemäß einer bevorzugten Ausführungsform die Nuten 2 in die ansonsten zylindrisch ausgeführte Innenoberfläche des Rohrs 1 eingebracht werden. Zwischen den Nuten 2 verbleiben somit Teile der zylinderförmig ausgeführten Innenoberfläche des Rohrs 1.

In die Fig. 2 ist die Nuttiefe TT und der Durchmesser D_i und der Innenoberflächenkreis 3 eingezeichnet.

In der Fig. 2 ist ebenfalls dargestellt, dass sich der Querschnitt der Nuten 2 durch einen Kreisbogen darstellen lässt.

Bei dem in Fig. 3 dargestellten Querschnitt des erfindungsgemäßen Rohrs 1 ist zu erkennen, dass gemäß einer alternativen Ausführungsform die im Nutgrund 4 konkav ausgeführten Nuten in Richtung auf den Nutmund 5 in eine konvexe Form übergehen können und dass der zwischen zwei Nuten 2 verbleibende Teil der Innenoberfläche nahezu bis auf eine Linie schrumpft. In die Fig. 3 ist die Nuttiefe TT und der Durchmesser Di und der Innenoberflächenkreis 3 eingezeichnet.

Fig. 4 zeigt die in der Tabelle wiedergegebenen Werte für $(H_{\min}(D_{\dot{A}_{qv}}, TT_{\min}, VD_{\max})$ [Watt]) und $H_{\max}(D_{\dot{A}_{qv}}, TT_{\max}, VD_{\min})$ [Watt]) in Abhängigkeit des Äquivalenzdurchmessers $D_{\dot{A}_{qv}}$. Zu erkennen ist, dass diese Werte durch jeweils eine Linie dargestellt werden können.

Fig. 5 und das in Fig. 5 abgebildete Detail Y geben beispielhaft an einem erfindungsgemäßen Rohr mit einer Nut die in den Ansprüchen und dieser Beschreibung verwendete Nomenklatur der Abkürzungen A_1 , r_1 , TT, h, b_2 , b_1 , A_T , r_2 und s wieder.

Wie die vier das Rohr charakterisierenden Werte N_T , Di, r_2 und TT gefunden werden können, lässt sich an den nachfolgenden Beispielen zeigen.

Bei einem Beispiel besteht die externe Anforderung, dass die Durchtrittsfläche dem eines Glattrohrs mit 60mm Durchmesser entsprechen soll. Ferner ergibt sich aus den für die Herstellung des Rohrs einsetzbaren Werkzeugen herstellungsseitig die Beschränkung, dass eine Nuttiefe TT von 1,3 mm und ein Radius r_2 des Kreisbogens des Nutgrunds von 8mm bei im Querschnitt kreisbogenförmigen Nuten gewählt werden soll. Fraglich ist, mit welchem Durchmesser Di und mit welcher Anzahl von Nuten die Wirtschaftlichkeit des thermischen Spaltens von Kohlenwasserstoffen in Röhrenöfen mit außenbeheizten Rohren verbessert werden kann.

Ausgangspunkt ist somit:

$$D_{\dot{A}_{qv}} = 60 \text{ mm}$$

$$A_{\dot{A}_{qv}} = \pi (60/2)^2 = 2827,43 \text{ mm}^2$$

$$TT = 1,3 \text{ mm}$$

$$r_2 = 8 \text{ mm}$$

$$\text{Aus } A_{\dot{A}_{qv}} \text{ ergibt sich unmittelbar } r_{\dot{A}_{qv}} = D_{\dot{A}_{qv}}/2 = 30 \text{ mm}$$

Aus r_2 , $r_{\dot{A}_{qv}}$ ergibt sich für die Bestimmung des N_{ref} im ersten Schritt mit der Formel

- 29 -

$$N_{ref} \leq \frac{\pi}{\arcsin \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_{\ddot{A}qv}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{\ddot{A}qv}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{\ddot{A}qv}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2}}{|r_{\ddot{A}qv}|}} \right)}$$

ein erstes N_{ref} von 18. Mit diesem N_{ref} von 18 ergibt sich aus der zuvor beschriebenen Zielwertsuche ein $r_{N_{ref}}$ von 29,1406241, bei dem zugleich die Nebenbedingung

$$5 \quad \pi \geq N_{ref} \cdot \arcsin \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_{N_{ref}}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{N_{ref}}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{N_{ref}}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2}}{|r_{N_{ref}}|}} \right), r_{N_{ref}} < r_{\ddot{A}qv}$$

erfüllt wird. Die Zahl 18 ist somit als N_{ref} zu verwenden.

Mit $N_{ref} = 18$ ergibt sich $VD = N_T/18 \cdot 100$.

Unter Einsetzen der minimalen Werte für P1, P2 und P3 ergibt sich für den linken Term der Gleichung

$$\begin{aligned} & P1 \cdot |D_{\ddot{A}qv}|^2 + P2 \cdot |D_{\ddot{A}qv}| + P3 \\ & = \\ & C1 + C2 \cdot |TT| + C3 \cdot VD + C4 \cdot |D_{\ddot{A}qv}| \\ & + (|TT| - C5) \cdot (VD - C6) \cdot C7 \\ & + (|TT| - C5) \cdot (|D_{\ddot{A}qv}| - C8) \cdot C9 \\ & + (VD - C6) \cdot (|D_{\ddot{A}qv}| - C8) \cdot C10 \\ & + (|D_{\ddot{A}qv}| - C8) \cdot (|D_{\ddot{A}qv}| - C8) \cdot C11 \end{aligned}$$

mit den Konstanten

$$\begin{aligned} C1 &= 1946,066 \\ C2 &= 302,378 \\ C3 &= -2,178 \\ C4 &= 266,002 \\ C5 &= 1,954 \\ C6 &= 50,495 \\ C7 &= -2,004 \\ C8 &= 79,732 \\ C9 &= -1,041 \end{aligned}$$

- 30 -

5

$$\begin{aligned}
 C10 &= 0,04631 \\
 C11 &= -0,26550 \\
 -0,2 &\geq P1 \geq -0,3 \\
 310 &\leq P2 \leq 315 \\
 200 &\leq P3 \leq 1500
 \end{aligned}$$

der Wert

10

$$P1 * |D_{\ddot{A}qv}|^2 + P2 * |D_{\ddot{A}qv}| + P3 = -0,3 * (60)^2 + 310 * 60 + 200 = 17.720$$

und unter Einsetzen der maximalen Werte für P1, P2 und P3 für den linken Term der Gleichung

15

$$P1 * |D_{\ddot{A}qv}|^2 + P2 * |D_{\ddot{A}qv}| + P3 = -0,2 * (60)^2 + 315 * 60 + 1500 = 19.680$$

Für den rechten Term der Gleichung

20

$$\begin{aligned}
 &C1 + C2 * |TT| + C3 * VD + C4 * |D_{\ddot{A}qv}| \\
 &+ (|TT| - C5) * (VD - C6) * C7 \\
 &+ (|TT| - C5) * (|D_{\ddot{A}qv}| - C8) * C9 \\
 &+ (VD - C6) * (|D_{\ddot{A}qv}| - C8) * C10 \\
 &+ (|D_{\ddot{A}qv}| - C8) * (|D_{\ddot{A}qv}| - C8) * C11
 \end{aligned}$$

25

ergibt sich nach Einsetzen von $|TT| = 1,3$ und $|D_{\ddot{A}qv}| = 60$

30

$$\begin{aligned}
 &1946,066 + 302,378 * 1,3 + -2,178 * VD + 266,002 * 60 \\
 &+ (1,3 - 1,954) * (VD - 50,495) * -2,004 \\
 &+ (1,3 - 1,954) * (60 - 79,732) * -1,041 \\
 &+ (VD - 50,495) * (60 - 79,732) * 0,04631 \\
 &+ (60 - 79,732) * (60 - 79,732) * -0,26550
 \end{aligned}$$

mithin:

35

$$18162,4329 - 1,7812 \text{ VD}$$

und mit $VD = N_T / N_{ref} * 100 = N_T / 18 * 100 = 5,5556$ N_T ergibt sich

$$18162,4329 - 9,8954 N_T$$

40

Um sicherzustellen, dass das Rohr die erfindungsgemäßen Vorteile erzielt, sollte N_T so gewählt werden, dass die Beziehung

$$19.680 \geq 18162,4329 - 9,8954 N_T$$

und die Beziehung

5

$$18162,4329 - 9,8954 N_T \geq 17.720$$

erfüllt ist. Beide Beziehungen wären mit $1 \leq N_T \leq 44,71$ erfüllt.

10

Da das so gefundene N_T größer ist, als die zuvor berechnete Größe N_{ref} ergibt sich, dass selbst beim Einbringen der maximal möglichen Zahl der Nuten ($N_{ref} = 18$) bei dieser Taltiefe immer noch die erfindungsgemäßen Vorteile erreicht werden können. Der Anwender ist in diesem Ausführungsbeispiel somit frei, das Rohr bis zur maximal möglichen Zahl der Nuten zu bestücken, ohne die Vorteile der Erfindung zu verlieren.

15

Mit dem so gefundenen N_T lässt sich der Radius r_1 des Rohres und damit der Innendurchmesser D_i ($= 2 r_1$) des Rohres mit der Formel (1) iterativ bestimmen, da $A_{\Delta qv} = 2827,43 \text{ mm}^2$ ist.

20

Mithin lassen sich alle für die Herstellung des Rohres, das die Vorzüge der Erfindung umsetzt, notwendigen Parameter bestimmen.

25

Patentansprüche:

1. Rohr zum thermischen Spalten von Kohlenwasserstoffen in Anwesenheit von Dampf, bei dem das Einsatzgemisch durch außenbeheizte Rohre geführt wird, wobei

- das Rohr (1) sich entlang einer Längsachse (A) erstreckt und eine Anzahl N_T in die Innenoberfläche des Rohres (1) eingebrachte, sich wendelförmig um die Längsachse (A) entlang der Innenoberfläche erstreckende Nuten (2) aufweist,
- die Innenoberfläche, in die die Nuten (2) eingebracht wurden, in einem Querschnitt senkrecht zur Längsachse (A) einen Durchmesser D_i und einen Radius $r_1 = D_i/2$ aufweist,
- die Nuten (2) in dem Querschnitt senkrecht zur Längsachse (A) in ihrem Nutgrund (4) jeweils die Form eines Kreisbogens haben und der Kreisbogen einen Radius r_2 hat,

die Nuten (2) jeweils eine Nuttiefe TT aufweisen, die in dem Querschnitt senkrecht zur Längsachse (A) jeweils dem kleinsten Abstand zwischen dem Kreis mit dem Durchmesser D_i , auf dem die Innenoberfläche liegt und dessen Mittelpunkt auf der Längsachse (A) liegt, und dem entferntesten Punkt des Nutgrunds (4) der Nut (2) von der Längsachse (A) entspricht **dadurch gekennzeichnet**,

dass der Zahlenwert $|D_{\ddot{A}qv}|$ eines Äquivalenzdurchmessers $D_{\ddot{A}qv}$ und die Anzahl N_T der Nuten (2) und der Zahlenwert $|TT|$ der in mm gemessenen Nuttiefe TT der Nuten (2) die Beziehung

$$\begin{aligned}
 &P1 * |D_{\ddot{A}qv}|^2 + P2 * |D_{\ddot{A}qv}| + P3 \\
 &= \\
 &C1 + C2 * |TT| + C3 * VD + C4 * |D_{\ddot{A}qv}| \\
 &+ (|TT| - C5) * (VD - C6) * C7 \\
 &+ (|TT| - C5) * (|D_{\ddot{A}qv}| - C8) * C9
 \end{aligned}$$

mit den Konstanten

$$\begin{aligned}
 C1 &= 1946,066 \\
 C2 &= 302,378 \\
 C3 &= -2,178 \\
 C4 &= 266,002 \\
 C5 &= 1,954 \\
 C6 &= 50,495 \\
 C7 &= -2,004 \\
 C8 &= 79,732
 \end{aligned}$$

- 33 -

$$\begin{aligned}
C9 &= -1,041 \\
-0,2 &\geq P1 \geq -0,3 \\
310 &\leq P2 \leq 315 \\
200 &\leq P3 \leq 1500
\end{aligned}$$

5 erfüllen,

wobei sich die Nutdichte VD, die das Verhältnis der Nuten N_T des Rohres im Verhältnis zu der Referenzzahl N_{ref} der maximal auf der Innenoberfläche eines Rohres mit gleichem Äquivalenzdurchmessers $D_{\ddot{A}qv}$ einbringbaren Nuten mit einer Nuttiefe TT = 1,3mm in Prozent beschreibt, aus der folgenden Beziehung ergibt:

$$VD = N_T / N_{ref} \cdot 100$$

15 und die Referenzzahl N_{ref} die größte natürliche Zahl ist, die die Beziehung

$$N_{ref} \leq \frac{\pi}{\arcsin \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_{\ddot{A}qv}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{\ddot{A}qv}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{\ddot{A}qv}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2}}{|r_{\ddot{A}qv}|}} \right)}$$

erfüllt, wobei

$$|r_{\ddot{A}qv}| = \left| \sqrt{\frac{|A_{\ddot{A}qv}|}{\pi}} \right|$$

$$A_{\ddot{A}qv} = A_1 + N_T \cdot A_T$$

20

$$A_1 = \pi \cdot |r_1|^2$$

$$A_T = \left[|r_2| \cdot \frac{b_2}{2} - \frac{s \cdot (|r_2| - (|TT| + h))}{2} \right] - \left[|r_1| \cdot \frac{b_1}{2} - \frac{s \cdot (|r_1| - h)}{2} \right]$$

$$b_1 = 2 \cdot |r_1| \cdot \arcsin \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2}}{|r_1|}} \right)$$

- 34 -

$$b_2 = 2 \cdot |r_2| \cdot \arcsin \left(\frac{\left| \sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2} \right|}{|r_2|} \right)$$

$$s = 2 \cdot \left| \sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2} \right|$$

$$h = \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)}$$

5 und zu der es ein r_{Nref} gibt, das unter Rückgriff auf den mit der vorstehenden Beziehung ermittelten Wert für $A_{\text{Äqv}}$ die folgenden Beziehungen erfüllt, wonach $A_{\text{Äqv}}$ ebenfalls

- 35 -

$$\begin{aligned}
& A_{\ddot{A}qv} \\
&= \pi \cdot |r_{Nref}|^2 + N_{ref} \\
&\cdot \left[\left[\begin{aligned} & \cdot |r_2|^2 \\ & \cdot \arcsin \left(\frac{\left| \sqrt{2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2} \right|}{|r_2|} \right) \\ & - \left| \sqrt{2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2} \right| \\ & \cdot \left(|r_2| - \left(1,3 + \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right) \right) \right] \\ & - \left[\begin{aligned} & |r_{Nref}|^2 \\ & \cdot \arcsin \left(\frac{\left| \sqrt{2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2} \right|}{|r_1|} \right) \end{aligned} \right] \end{aligned} \right]
\end{aligned}$$

- 36 -

$$- \left[\sqrt{2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2} \right] \cdot \left(|r_{Nref}| - \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right) \right]$$

ohne die Nebenbedingungen

$$\pi \geq N_{ref} \cdot \arcsin \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2}}{|r_{Nref}|} \right), r_{Nref} < r_{\ddot{A}qv}$$

zu verletzen und wobei sich der Äquivalenzdurchmesser $D_{\ddot{A}qv}$ aus der Beziehung $D_{\ddot{A}qv} = 2 r_{\ddot{A}qv}$ ergibt.

2. Rohr zum thermischen Spalten von Kohlenwasserstoffen in Anwesenheit von Dampf, bei dem das Einsatzgemisch durch außenbeheizte Rohre geführt wird, wobei

- das Rohr (1) sich entlang einer Längsachse (A) erstreckt und eine Anzahl N_T in die Innenoberfläche des Rohres (1) eingebrachte, sich wendelförmig um die Längsachse (A) entlang der Innenoberfläche erstreckende Nuten (2) aufweist,
- die Innenoberfläche, in die die Nuten (2) eingebracht wurden, in einem Querschnitt senkrecht zur Längsachse (A) einen Durchmesser D_i und einen Radius $r_1 = D_i/2$ aufweist,
- die Nuten (2) in dem Querschnitt senkrecht zur Längsachse (A) in ihrem Nutgrund (4) jeweils die Form eines Kreisbogens haben und der Kreisbogen einen Radius r_2 hat,

die Nuten (2) jeweils eine Nuttiefe TT aufweisen, die in dem Querschnitt senkrecht zur Längsachse (A) jeweils dem kleinsten Abstand zwischen dem Kreis mit dem Durchmesser D_i , auf dem die Innenoberfläche liegt und dessen Mittelpunkt auf der Längsachse (A) liegt, und dem entferntesten Punkt des Nutgrunds (4) der Nut (2) von der Längsachse (A) entspricht **dadurch gekennzeichnet**,

- 37 -

dass der Zahlenwert $|D_{\ddot{A}qv}|$ eines Äquivalenzdurchmessers $D_{\ddot{A}qv}$ und die Anzahl N_T der Nuten (2) und der Zahlenwert $|TT|$ der in mm gemessenen Nuttiefe TT der Nuten (2) die Beziehung

$$\begin{aligned}
 & P1 * |D_{\ddot{A}qv}|^2 + P2 * |D_{\ddot{A}qv}| + P3 \\
 & = \\
 & C1 + C2 * |TT| + C3 * VD + C4 * |D_{\ddot{A}qv}| \\
 & + (|TT| - C5) * (VD - C6) * C7 \\
 & + (|TT| - C5) * (|D_{\ddot{A}qv}| - C8) * C9 \\
 & + (VD - C6) * (|D_{\ddot{A}qv}| - C8) * C10 \\
 & + (|D_{\ddot{A}qv}| - C8) * (|D_{\ddot{A}qv}| - C8) * C11
 \end{aligned}$$

mit den Konstanten

$$\begin{aligned}
 & C1 = 1946,066 \\
 & C2 = 302,378 \\
 & C3 = -2,178 \\
 & C4 = 266,002 \\
 & C5 = 1,954 \\
 & C6 = 50,495 \\
 & C7 = -2,004 \\
 & C8 = 79,732 \\
 & C9 = -1,041 \\
 & C10 = 0,04631 \\
 & C11 = -0,26550 \\
 & -0,2 \geq P1 \geq -0,3 \\
 & 310 \leq P2 \leq 315 \\
 & 200 \leq P3 \leq 1500
 \end{aligned}$$

erfüllen,

wobei sich die Nutdichte VD , die das Verhältnis der Nuten N_T des Rohres im Verhältnis zu der Referenzzahl N_{ref} der maximal auf der Innenoberfläche eines Rohres mit gleichem Äquivalenzdurchmessers $D_{\ddot{A}qv}$ einbringbaren Nuten mit einer Nuttiefe $TT = 1,3$ mm in Prozent beschreibt, aus der folgenden Beziehung ergibt:

$$VD = N_T / N_{ref} * 100$$

und die Referenzzahl N_{ref} die größte natürliche Zahl ist, die die Beziehung

- 38 -

$$N_{ref} \leq \frac{\pi}{\arcsin \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_{\ddot{A}qv}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{\ddot{A}qv}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{\ddot{A}qv}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2}}{|r_{\ddot{A}qv}|}} \right)}$$

erfüllt, wobei

$$|r_{\ddot{A}qv}| = \left| \sqrt{\frac{|A_{\ddot{A}qv}|}{\pi}} \right|$$

$$A_{\ddot{A}qv} = A_1 + N_T \cdot A_T$$

5

$$A_1 = \pi \cdot |r_1|^2$$

$$A_T = \left[|r_2| \cdot \frac{b_2}{2} - \frac{s \cdot (|r_2| - (|TT| + h))}{2} \right] - \left[|r_1| \cdot \frac{b_1}{2} - \frac{s \cdot (|r_1| - h)}{2} \right]$$

$$b_1 = 2 \cdot |r_1| \cdot \arcsin \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2}}{|r_1|}} \right)$$

$$b_2 = 2 \cdot |r_2| \cdot \arcsin \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2}}{|r_2|}} \right)$$

$$s = 2 \cdot \left| \sqrt{2 \cdot |r_1| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)} \right)^2} \right|$$

10

$$h = \frac{2 \cdot |r_2| \cdot |TT| - |TT|^2}{2 \cdot (|r_1| - |r_2| + |TT|)}$$

und zu der es ein r_{Nref} gibt, das unter Rückgriff auf den mit der vorstehenden Beziehung ermittelten Wert für $A_{\ddot{A}qv}$ die folgenden Beziehungen erfüllt, wonach $A_{\ddot{A}qv}$ ebenfalls

- 39 -

$$\begin{aligned}
& A_{\tilde{A}qv} \\
&= \pi \cdot |r_{Nref}|^2 + N_{ref} \\
&\cdot \left[\left[\begin{aligned} & \cdot |r_2|^2 \\ & \cdot \arcsin \left(\frac{\left| \sqrt{2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2} \right|}{|r_2|} \right) \\ & - \left| \sqrt{2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2} \right| \\ & \cdot \left(|r_2| - \left(1,3 + \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right) \right) \right] \\ & - \left[\begin{aligned} & |r_{Nref}|^2 \\ & \cdot \arcsin \left(\frac{\left| \sqrt{2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2} \right|}{|r_1|} \right) \end{aligned} \right] \end{aligned} \right]
\end{aligned}$$

- 40 -

$$- \left[\sqrt{2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2} \right] \\ \cdot \left(|r_{Nref}| - \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right) \Bigg]$$

ohne die Nebenbedingungen

$$\pi \geq N_{ref} \cdot \arcsin \left(\frac{\sqrt{2 \cdot |r_{Nref}| \cdot \frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} - \left(\frac{2 \cdot |r_2| \cdot 1,3 - 1,3^2}{2 \cdot (|r_{Nref}| - |r_2| + 1,3)} \right)^2}}{|r_{Nref}|} \right), r_{Nref} < r_{\ddot{A}qv}$$

zu verletzen und wobei sich der Äquivalenzdurchmesser $D_{\ddot{A}qv}$ aus der Beziehung $D_{\ddot{A}qv} = 2 r_{\ddot{A}qv}$ ergibt.

5

3. Rohr nach einem der Ansprüche 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Innenoberfläche des Rohrs zylinderförmig ist und in diese zylinderförmige Innenoberfläche die Nuten eingebracht werden, so dass zwischen den Nuten Teile der Innenoberfläche verbleiben, die Teile eines Zylinders bilden.

10

4. Rohr nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass in einem Querschnitt senkrecht zur Längsachse das von einem zwischen zwei Nuten angeordneten Teil der Innenoberfläche eingenommene Kreisbogensegment auf dem Innenoberflächenkreis größer ist als 1% des von dem Nutmund zumindest einer der an diesen Teil der Innenoberfläche angrenzenden Nuten eingenommenen Kreisbogensegment auf dem Innenoberflächenkreis.

15

5. Rohr nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Durchmesser D_i der Innenoberfläche, in die die Nuten (2) eingebracht wurden in einem Bereich von 15 mm bis 280 mm liegt.

20

6. Rohr nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Nuttiefe TT in einem Bereich von 0,1 mm bis 10 mm liegt.

25

7. Rohr nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Anzahl N_T der Nuten (2) eine Nutdichte zur Folge hat, die in einem Bereich von 1% bis 347% liegt.
- 5 8. Rohr nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Nuten (2) in einem Winkel von 20° bis 40°, vorzugsweise von 22,5° bis 32,5°, bezogen auf die Längsachse (A), verlaufen.
- 10 9. Rohr nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Rohr ein Schleudergußrohr ist oder aus einem Schleudergußrohr durch Einbringen von Nuten in ein Schleudergußrohr hergestellt wurde.
- 15 10. Rohr nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Rohr eine Nickel-Chrom-Eisen-Legierung mit hoher Oxidations- und Aufkohlungsbeständigkeit, Zeitstandfestigkeit und Kriechbeständigkeit aus
- 20 0,05% bis 0,6% Kohlenstoff
20% bis 50% Chrom
5% bis 40% Eisen
2% bis 6% Aluminium
bis 2% Silizium
bis 2% Mangan
bis 1,5% Niob
bis 1,5% Tantal
25 bis 6,0% Wolfram
bis 1,0% Titan
bis 1,0% Zirkonium
bis 0,5% Yttrium
bis 0,5% Cer
30 bis 0,5% Molybdän
bis 0,1% Stickstoff
Rest Nickel einschließlich erschmelzungsbedingter Verunreinigungen aufweist, insbesondere aus einer solchen Legierung besteht.
- 35 11. Vorrichtung zum thermischen Spalten von Kohlenwasserstoffen in Anwesenheit von Dampf, bei dem das Einsatzgemisch durch außenbeheizte Rohre geführt wird, **gekennzeichnet durch** ein Rohr nach einem der Ansprüche 1 bis 10.
- 40 12. Verwendung eines Rohrs nach einem der Ansprüche 1 bis 10 zum thermischen Spalten von Kohlenwasserstoffen in Anwesenheit von Dampf, bei dem das Einsatzgemisch durch außenbeheizte Rohre geführt wird.