

A 46

Bericht Nr. 508

Untersuchungen an Rippenrohren

3. Teil:

**Hochdruckrohre mit rechteckigen
geschweißten Rippen.**

Einbau von Verdrängern

8972



**I. G. FARBENINDUSTRIE AKTIENGESELLSCHAFT
LUDWIGSHAFEN AM RHEIN**

Bericht des Technischen Prüfstandes Oppau

Nr. 508

Untersuchungen an Hochdruckrippenrohren.

(Vortrag, gehalten auf der 6. Wärmetagung in Oppau am 18. u. 19. 5. 1942)

Übersicht: Es werden die Messungen an Hochdruckrohren 120/171 mm ϕ (325 at) mit aufgeschweißten, rechteckigen Rippen besprochen. Untersucht wurde die Mammutrippe 380x325 mm, die Normalrippe 270x320 mm und die verkürzten Rippen 270x300 und 270x270 mm. Weiterhin wird die Wirkung von Verdrängern untersucht. In der Versuchsanlage wurden unter gleichen Bedingungen wie in einem Spitzenvorheizler die Wärmeübergangszahlen gemessen. Wärmeleistung Q und der Druckverlust Δp bei einer Gasgeschwindigkeit von 8 m/sec in der Gasse ergaben folgende Vergleichswerte:

	Q	Δp
Normalrippe 270x320	100%	100%
Mammutrippe 380x325	108%	112%
abgeschn. Rippe 270x300) mit	111%	98%
" " 270x270) Verdränger	112%	186%

Die Rippe 270x300 mit Verdränger ist demnach am günstigsten hinsichtlich Wärmeleistung und Druckverlust.- Die Messung der Verteilung von Rippentemperaturen und Gasgeschwindigkeiten ergibt Einblicke in den Wärmetrom der Rippen und zeigt vor allem den Wert der seitlichen Rippflächen.

Abgeschlossen am: 3.7.1942 L.

Bearbeiter: Dr.-Ing. Gg. Kling

Gg. Kling

Die vorliegende Ausfertigung (2) enthält

16 Textblätter

- Bildblätter

8973

Verteiler

Nr.	am	Empfänger	Nr.	am	Empfänger
1	18.7.42	Herrn Dir. Dr. Sauer	10	"	Herrn Dipl. Ing. Wöhner
2	"	Herrn Dir. Dr. Eymann	11	"	Herrn Dr.-Ing. Wilde
3	"	Herrn Dir. Josenhans	12	"	Herrn Dr.-Ing. Kling
4	"	Herrn Dir. Dr. Lappe	13-24	"	Hochdruckversuche, für Erfahrungsaustausch der Hydrrierwerke.
5	"	Herrn Obering. Dr. Schierenbeck	25 u. 26	"	Techn. Prüfstand Op.
6	"	Herrn Obering. Berger	26	21.7.42	Herrn Dr. Schierenbeck
7	"	Herrn Obering. Raithel	27	25.3.43	Herrn Dr. Schierenbeck
8	"	Herrn Obering. Richter	28	28.3.43	Herrn Dr. Schierenbeck
9	"	Herrn Dipl. Ing. Schappert	29	4.7.43	Herrn Dr. Schierenbeck

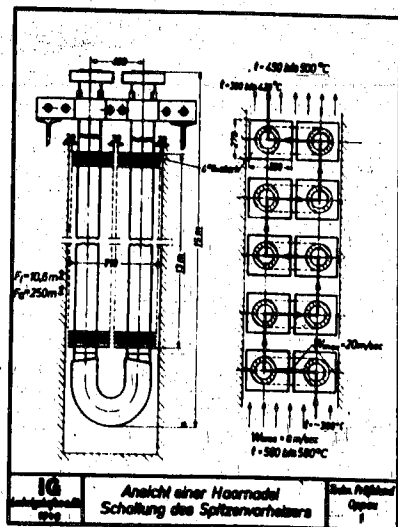
Untersuchungen an Hochdruckrippenrohren.

(Vortrag, gehalten auf der 6. Wärmetagung in Oppau am 18.u.19.Mai 1942.)

In den Hydrieranlagen muß der zu verarbeitende Kohlebrei mit Wasserstoffgas unter hohem Druck auf Reaktionstemperatur vorgeheizt werden. Diese Vorheizung kann zu einem großen Teil aus der Regeneration gegen das abziehende Produkt gewonnen werden, der Rest muß in den Spitzenvorheizern zugeführt werden.

Die Spitzenvorheizern bestehen aus einem Rohrbündel hintereinandergeschalteter Hochdruckrohre, durch die innen der Kohlebrei fließt und die außen im Querstrom von heißen Verbrennungsgasen umspült werden. Ein Gebläse wälzt die Gase um, die durch Zusatz frischer Heizgase auf gleicher Eingangstemperatur gehalten werden. Die Rohre stehen senkrecht in einer gemauerten Gasse. Zum Ausgleich des schlechten Wärmeüberganges der Gasseite sind außen zahlreiche Rippen aufgeschweißt.

Im Lichtbild sei ein Schnitt durch die Gasse eines solchen Spitzenvorheizers gezeigt. Zwei Hochdruckrohre sind jeweils nebeneinander angeordnet und durch den unten angeschweißten Bogen zur sogenannten "Haarnadel" verbunden. Die Haarnadeln werden von oben in die Gasse eingehängt und die oberen Flansche durch Bogenstücke mit der vorhergehenden und folgenden Haarnadel verbunden.



Über die Abmessungen von Haarnadeln und Gasse bestehen bestimmte Normen. Diese sind z.B. für die 325 at Hochdruckrohre von 120/171 mm ϕ , die von uns meist untersucht wurden, im Lichtbild eingetragen:

Länge der Haarnadel	15100 mm,
Berippung	13400 mm,
Rippenteilung	14 mm,
Rippenstärke	4 mm,
Rohrabstand	400 mm,
Gassenbreite	710 mm.

Für die Rippenabmessung war bisher 270x320 mm als normales Maß üblich.

Einige Betriebswerte, wie sie zum Beispiel im Gemischteil eines Vorheizers dieser Art für Steinkohle anzutreffen sind, sind im Grundriß rechts eingetragen:

Wälzgasseite:

Gasgeschwindigkeit:	vor den Haarnadeln	8 m/sec
	im engeren Querschnitt der 1.Haarnadel	20 m/sec
Eintrittstemperatur		560 bis 580°C
Austritts- "		400 bis 450°C.

Produktseite:

Eintrittstemperatur		~ 300°C
Austritts- "		400 bis 425°C.

Die Wärmeaustauschflächen sind beispielsweise für die gezeigte Haarnadel:

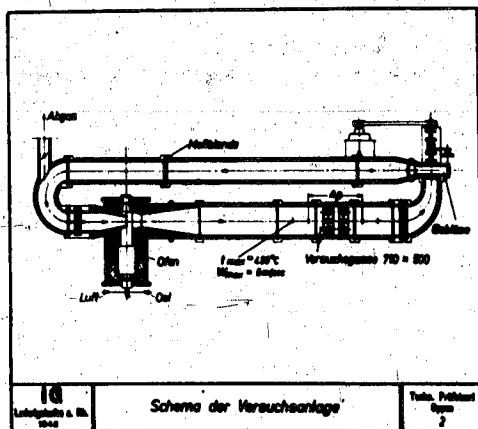
Innere Rohroberfläche F_1	10,6 m ²
Äußere Rohr- u. Rippenoberfläche F_a	250 m ² .

Recht beachtlich ist auch das Gewicht einer solchen Haarnadel von 7,5 to, das sich aufteilt in 3 to für die Rohre aus legiertem Stahl N 8 oder N 10 und in 4,5 to für die Rippenbleche aus gewöhnlichem Stahl St 00. Der Preis einer Haarnadel beträgt etwa RM 15000.--, wobei die Herstellungskosten den weitaus größten Anteil gegenüber den Materialkosten ausmachen.

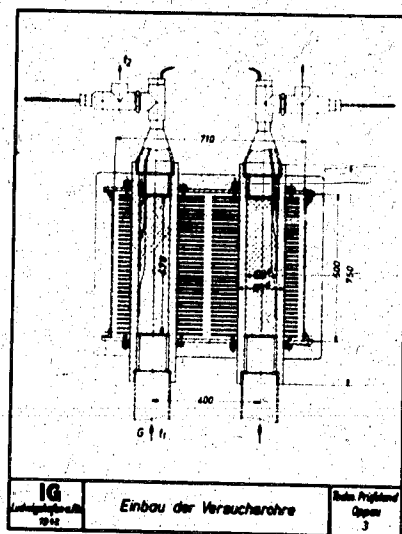
Diese Angaben sollen veranschaulichen, daß auch geringe prozentuale Verbesserungen der Wärmeleistung einer Haarnadel bereits erhebliche Materialmengen und Werkstattarbeiten einsparen gestatten. Beispielsweise würde eine 5%ige Verbesserung in einem Vorwärmer von 20 Haarnadeln die Einsparung einer ganzen Haarnadel bedeuten. - Andererseits könnte für einen bestehenden Vorheizer durch einen höheren k -Wert die Gastemperatur gesenkt und damit die Betriebssicherheit erhöht werden. Gleichzeitig ist auch eine Produktionsreserve gegeben sowie ein Ausgleich für Verkrustung, Versunderung der Rippen usw.

Es war nun die Aufgabe unserer Versuche, grundsätzlich einmal die Vorgänge der Wärmeübertragung in einem berippten Hochdruckrohr eingehend zu untersuchen. Darüber hinaus lagen zahlreiche Verbesserungsvorschläge von seiten der Konstruktionsbüros und der Werkstätten vor, die auf ihr wärmetechnisches Verhalten hin zu prüfen waren.

Bei der Planung einer Versuchsanlage lag nun der Gedanke zu Grunde, möglichst die gleichen Betriebsbedingungen nachzuahmen, die auch in einem Spitzenvorheizer anzutreffen sind. Eine schematische Darstellung sei im Lichtbild gegeben. In einem Ofen wird Öl verbrannt und die Heizgase durch eine Düse in den Gaskreislauf angesaugt. Mit etwa 420°C und maximal 8 m/sec strömen die Verbrennungsgase durch die Versuchsgasse von 710 mm Breite und 500 mm Höhe. Der Gasumlauf wird von einem Ventilator bewirkt. Die Gasmenge wird in einer Blende von 400/500 mm ϕ gemessen. In der Gasse können jeweils 4 Rohre im Gruppeneintau untersucht werden.



Die Versuchsrohre haben 750 mm Länge und sind auf 450 mm Länge berippt. Sie wurden in denselben Werkstätten geschweißt, in denen auch die Haarnadeln angefertigt werden. Die Versuchsrohre mit etwa 30 Rippen stellen somit ein naturgetreues Probestück in normaler Werkstattdarstellung dar. Die Verminderung der Gassenhöhe von 15 mm auf 4 mm ist ohne Einfluß auf das eigentliche Wärmeübergangsproblem. - Der gassseitige Einbau der Versuchsrohre entspricht genau den wirklichen Verhältnissen in einer Gasse. Auf der Produktseite war es uns natürlich nicht möglich, Kohlebrei unter 300 at durchzupressen. Statt dessen wurde kalte Druckluft innen durch die Rohre geschickt und die erforderlichen hohen α -Werte durch eine Füllung von Stahlkugeln erzielt. Die Endeneinflüsse der Rohre wurden durch isolierende Porzellanrohre ausgeschaltet, die zugleich auch als Stütze für zwei Siebe dienten.



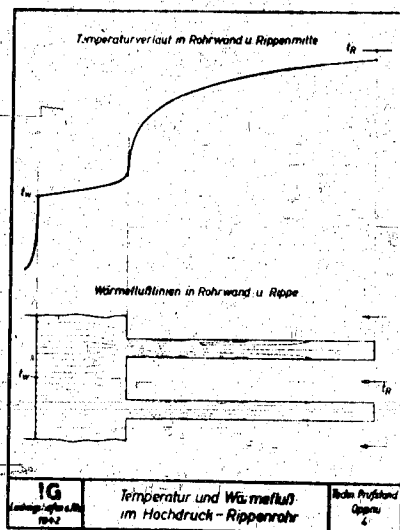
Zur meßtechnischen Ausrüstung gehörten 6 Thermolemente, mit denen an verschiedenen Stellen der Rohrrinnenwand die mittlere Temperatur der Rohroberfläche gemessen wurde. Die Austrittstemperatur der Luft zeigte ein starkes radiales Gefälle, sodaß ihr Mittelwert erst nach Durchmischung in den oberen T-Stücken richtig zu messen war. Weiter wurde noch die Luftmenge mit Blenden gemessen und die Eintrittstemperatur der Luft. Aus diesen Messungen war sehr genau für jedes Versuchsrohr die vom Gas an die Luft übertragene Wärme zu bestimmen als:

$$Q = G \cdot C_p \cdot (t_2 - t_1)$$

Eine nähere Erläuterung erfordert noch der Begriff der äußeren Wärmeübergangszahl α_a ; diese ist:

$$\alpha_a = \frac{Q}{F_a \cdot (t_g - t_w)}$$

Im Lichtbild ist der Schnitt durch Wand und Rippe eines Hochdruckrohres dargestellt. Die Wärmestromlinien sind eingezeichnet, wie sie schätzungsweise unter Berücksichtigung der radialen Flächenvergrößerung und der abnehmenden Temperaturdifferenz Gas gegen Rippenoberfläche verlaufen könnten. Zu beachten ist vor allem der starke Wärme flu ß im Rippenfuß, d.h. also an der Verbindungsstelle zwischen Hochdruckrohr und Rippenblech. Während nun die äußere Wärmeübergangszahl α_a sinngemäß auf die äußere Oberfläche F_a bezogen wird, so ist dies nicht sinngemäß mit der Temperatur möglich. Längs der äußeren Oberfläche, insbesondere längs der langen Rippen ist die Temperatur sehr unterschiedlich, so daß man nicht wüßte, welcher Wert einzusetzen ist. Auch an der äußeren Rohroberfläche selbst ist keine gleiche Temperatur vorhanden. Nach allgemeiner Gepflogenheit wird daher die innere Wandtemperatur t_w als Bezugstemperatur gewählt, da diese einem gleichmäßigen Wärme flu ß zugeordnet ist.

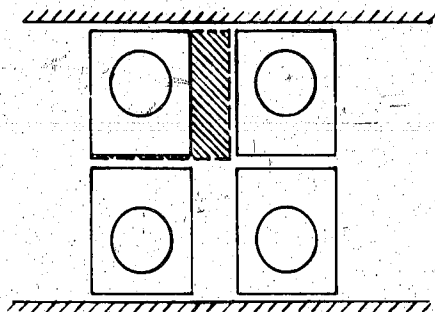


Der α_a -Wert enthält demgemäß alle Wärmewiderstände des Hochdruckrohres, d.i. Wärmewiderstand der Rohrwand, der Schweißstelle am Rippenfuß, der Rippe selbst und des Wärmeüberganges von den Oberflächen an das Gas durch Strahlung und Konvektion. Rechnungsmäßig sind diese Werte nicht zu unterteilen, da sie teils hintereinander, teils parallel geschaltet sind, teils auch mit dem Radius veränderlich sind. Durch geeignete Versuchsführung lassen sich jedoch aus den Ergebnissen oft wichtige Erkenntnisse über die Einflüsse bestimmter Wärmewiderstände folgern.

Bei unseren Versuchen wurde im allgemeinen nur die Wälzgasgeschwindigkeit in weitem Bereich verändert, während Wälzgastemperatur und Kühlluftmenge sowie Kühlluft-Temperatur konstant blieben. Für einige bestimmte Fälle wurde auch die Gastemperatur variiert. Eine Änderung der Kühlluftmenge war ohne Einfluß auf α_a .

Das zahlreiche vorliegende Versuchsmaterial kann nicht alles im Rahmen eines Vortrages gebracht werden. Es wird daher ein Spezialfall, der Wärmeübergang an Hochdruckrohre mit aufgeschweißten Rechteckrippen, herausgegriffen und dieser im folgenden ausführlicher behandelt, zumal dieser Fall der für die Praxis im Augenblick bedeutendste und wichtigste ist.

Betrachtet sei ein Grundriß der üblichen Haarnadelanordnung in einer Gasse, wobei die Rippen die Abmessung 270x320 haben:



Es liegt nun der Gedanke nahe, den gesamten freien Raum mit Rippenblech auszufüllen, um durch vergrößerte Oberfläche F_a , die Wärmeleistung q zu erhöhen gemäß der Formel:

$$q = \alpha_a \cdot F_a \cdot \Delta t$$

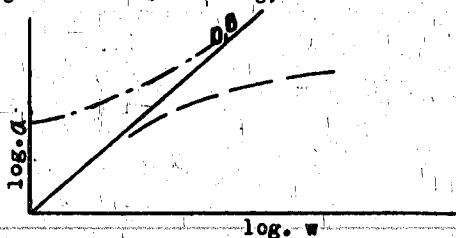
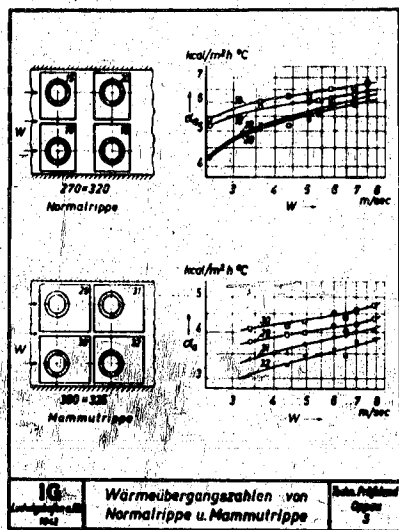
Bezogen auf konstantes Δt würde dabei q linear mit F_a zunehmen, wenn α_a gleich bliebe, oder sich nur wenig änderte. Die größte Rippe, die als Mammutrippe bezeichnet sei, würde die Abmessung 380x325 haben. Sie würde die ganze freie Fläche ausfüllen  bis auf die Spalte von 20 mm gegen Gassenwand und Nachbarrippen, die für den Einbau der Haarnadeln unbedingt erforderlich sind. Die Rippen wurden einseitig in Richtung der Gasströmung verlängert, da hier der schlechtere Wärmeübergang infolge des Windschattens vom Rohr her ist. Das ist nicht ganz richtig, da ja auch der Rippenwirkungsgrad mit längerer Rippe schlechter wird (worauf später noch eingegangen wird).

Die Meßergebnisse sind im Lichtbild dargestellt, wo die äußere Wärmeübergangszahl α_a in Abhängigkeit von der Rauchgasgeschwindigkeit w in der Gasse aufgetragen ist. Die Zahlen an den vier Kurven entsprechen den Nummern der vier Versuchsrohre. Die Kurven der beiden hinteren Rohre liegen niedriger als die der vorderen Rohre. Das hat einen rein rechnerischen Grund, da die α_a -Werte aller Rohre auf die Rauchgastemperatur vor den Rohren bezogen ist. In Wirklichkeit ist aber das Gas am vorderen Rohr schon etwas abgekühlt, wenn es zum hinteren Rohr kommt. Berücksichtigt man diese Abkühlung, die ja aus der Wärmeaufnahme des vorderen Rohres zu errechnen ist, so ergeben sich praktisch die gleichen α_a -Werte. Im Rahmen der Versuchsgenauigkeit könnte man für die hinteren Rohre evtl. um einige % niedrigere α_a -Werte herauslesen; aber das ist zu unsicher.

Der flache Verlauf der Kurven weist auf einen geringen Geschwindigkeitsexponenten hin, sofern man die Meßwerte formelmäßig ausdrücken wollte als:

$$\alpha = k \cdot w^n \quad (1)$$

wie das bei der Beurteilung solcher Messungen gern getan wird. - Würde man einen quer angeströmten Zylinder vom äußeren Rohrdurchmesser aber ohne Rippen betrachten, so würde man für 8 m/sec eine Reynoldssche Zahl von 40000 und danach nach Hilpert ein n von 0,62 bis 0,80 zu erwarten haben. Rechnet man in Anlehnung an die Rippen mit einer längs angeströmten ebenen Platte, so wäre $Re=60000$ und nach Jürges $n = 0,78$. - Demgegenüber ergeben die Rippenrohr-Kurven wesentlich niedrigere Geschwindigkeitsexponenten. Betrachtet man nun allgemein ein Koordinatensystem mit logarithmischer Teilung, so würde eine Funktion der angegebenen Art als Gerade unter dem Winkelverhältnis des Exponenten, z.B. 0,8 erscheinen.



Die Rippenrohrversuche ergeben nach rechts hin gekrümmte Kurven, d.h. also, daß mit zunehmender Rauchgasgeschwindigkeit wohl der gaseitige Wärmeübergang besser wird, oder auch anders gesprochen, der Wärmewiderstand von Rippenoberfläche ans Gas kleiner wird, daß aber auch gleichzeitig die Wärmewiderstände im Rippen- und Rohrmaterial immer stärker zur Geltung kommen. Mathematisch ausgedrückt ist danach:

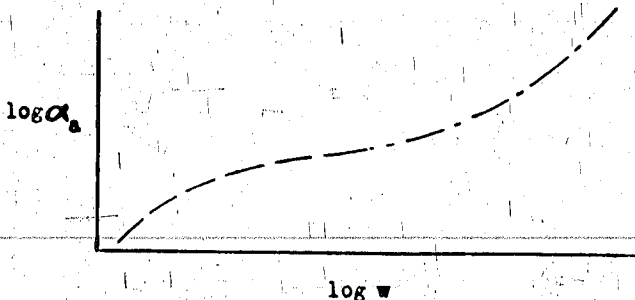
$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{K \cdot w^n} + K_M} \quad (2)$$

wo K_M die Summe aller Materialwärmewiderstände bedeutet. K_M ist also der Hemmschuh, der einer α -Verbesserung durch höhere Geschwindigkeit im Wege steht. Natürlich wird K_M größer bei langen und vielen Rippen, ebenso bei schlechter Schweißverbindung am Rippenfuß.- Für sehr hohe Geschwindigkeiten muß α einem konstanten Wert, nämlich K_M zustreben. Rechnet man nun für die zylindrische Rohrwandung den Wärmewiderstand aus, so erhält man den Wert 0,001. Unsere α -Werte streben aber Werten zu, deren Wärmewiderstände etwa hundert mal größer sind. Daraus muß gefolgert werden, daß der wesentlichste Anteil von K_M im Rippenfuß und in der Rippe selbst zu suchen ist, während der Anteil im Hochdruckrohr gering ist.

Neben dem Wärme fluß in den Rippen ist noch ein parallel geschalteter Wärme fluß vom Gas an die freien Rohroberflächen zwischen den Rippen vorhanden. Die Parallelschaltung zweier Wärmeübergänge muß sich in der logarithmischen Darstellung durch nach oben gekrümmte Kurven bemerkbar machen, die allmählich dem Exponenten $n = 0,8$ zustreben würden. Mathematisch wäre die Gleichung 2, deren α jetzt mit α_{Rippe} bezeichnet sei, noch um den Summanden α_{Rohr} zu erweitern zu:

$$\alpha = \alpha_{\text{Rippe}} + \alpha_{\text{Rohr}}$$

In übertriebener Darstellung ist also für die Hochdruck-Rippenrohre folgender Kurvenverlauf zu erwarten:



Tatsächlich ist in den logarithmischen Auftragungen unserer Versuche bei hohen Geschwindigkeiten, bei denen das Gas das eigentliche Rohr besser bespült eine Umkehr der Kurven nach oben festzustellen. Bei der Mammutrippe ist diese Tendenz ausgeprägter als bei der Normalrippe, da ja bei der langen Rippe K_M größer ist und α_{Rippe} viel früher einen konstanten Wert erreicht.

Der rechte ansteigende Kurvenast könnte nun dazu verleiten, eine weitere Geschwindigkeitsteigerung zu verlangen. Für die Rippe ist dadurch nichts gewonnen, lediglich die Wärmeübergangszahl α_{Rohr} ist steigerungsfähig, aber nicht sehr weit. Denn bald müßte sich das erste Spiel wiederholen, indem die Reihenschaltung des Wärmewiderstandes der Rohrwand jetzt wirksam wird. Die Kurve würde wieder nach rechts umbiegen und endgültig einem konstanten α_a -Wert zustreben.

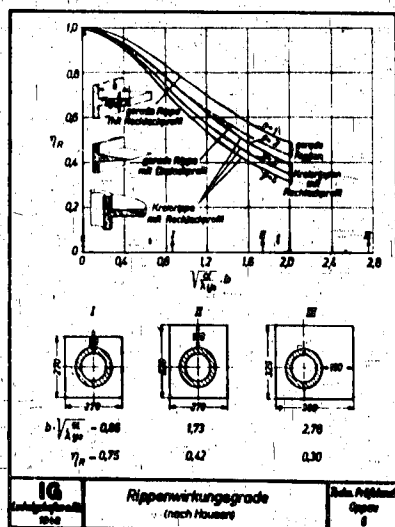
Die Darlegungen sollten veranschaulichen, welche Grenzen der Wärmeübergangszahl durch Erhöhung der Geschwindigkeit gesetzt sind. Aus den Versuchsergebnissen ist zu ersehen, daß der erste Wendepunkt im allgemeinen erreicht oder überschritten ist, d.h. also, daß die Wirksamkeit der Rippen durch höhere Gasgeschwindigkeit nicht mehr verbessert werden könnte. Für die kleinere Steghöhe der Normalrippe tritt der Wendepunkt natürlich bei viel höheren Geschwindigkeiten als bei der längeren Mammutrippe auf.-

Die Absolutwerte von α_a sind bei der Mammutrippe um $\frac{1}{3}$ kleiner als bei der Normalrippe. Der Grund liegt in der schlechteren Wärmeleistung der Rippe.

Die Theorie der Wärmeübertragung in Rippen ist bereits eingehend von E. Schmidt, Hausen, Bogaerts u. Meyer und anderen bearbeitet worden. Dabei hat sich allgemein der Begriff des Rippenwirkungsgrades eingeführt, der definiert ist durch das Verhältnis von wirklich übertragener Wärmemenge Q zur möglichen Wärmemenge Q_0 , wenn die Rippe überall die Temperatur des Rippenfußes hätte:

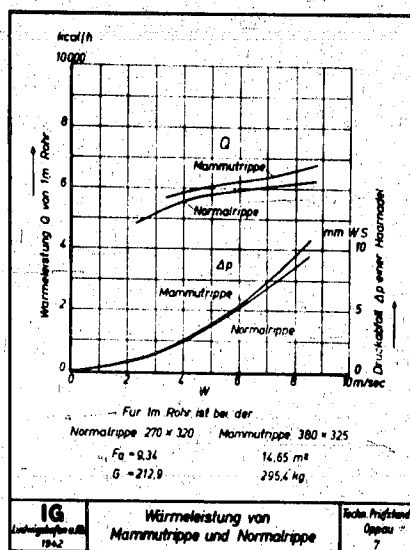
$$\eta_R = \frac{Q}{Q_0}$$

Im Lichtbild ist η_R dargestellt in Abhängig-

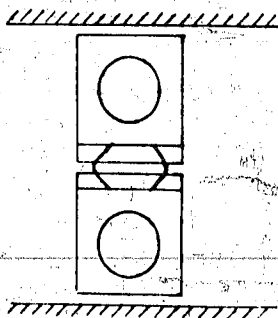


keit von einer dimensionslosen Größe $\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda \cdot y_0}}$, b, worin bedeutet: α = Wärmeübergangszahl in der Rippenfläche, λ = Wärmeleitfähigkeit vom Rippenmaterial, y_0 = halbe Rippenstärke und b = Rippenbreite. Für die drei Rippenabmessungen, die im Bild unten gezeichnet sind, wurden für die Rippenstege von 50, 100 und 160 mm die Werte $b \cdot \frac{\alpha}{\lambda \cdot y_0}$ errechnet und im Lichtbild durch Pfeile angedeutet. Aus dem Mittel des Kurvenbündels erhält man die unten angeschriebenen η_R -Werte. Von Fall II auf III sinkt η_R um etwa 73, d. i. größenordnungsmäßig derselbe Betrag wie die α_a -Verringerung beider Rippenrohrtypen nach den im vorigen Lichtbild gezeigten Versuchen. - Würde der Rippensteg auf 50 mm verkleinert, wie z. B. im Fall I mit der quadratischen Rippe 270x270, so steigt η_R auf 75% an.

Der Vergleich zwischen Mammutrippe und Normalrippe wäre unvollständig, würde man nicht die übertragbaren Wärmemengen als Produkt von α_a und der Fläche F_a miteinander vergleichen. Im Lichtbild sind die pro 1 m berippter Rohrlänge übertragbaren Wärmemengen Q, bezogen auf ein Temperaturgefälle von 100°C, und unter Benutzung mittlerer α_a -Werte dargestellt. Der Vergleich bei $w = 8$ m/sec zeigt eine 8% höhere Wärmeleistung der Mammutrippe, die allerdings auf Kosten einer 57% größeren Fläche und eines 39% höheren Gewichtes erkauft ist. Ebenfalls ist der Druckabfall um 13% höher.

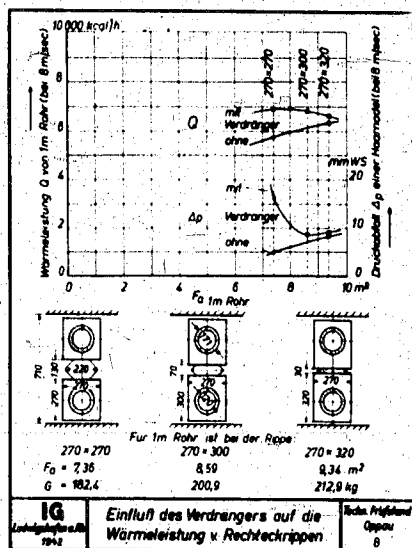


Es bleibt jetzt noch die Frage zu klären, wie sich eine Verkleinerung der Rippe auf die Wärmeleistung des Vorheizers auswirkt. Hierzu sei nochmals der Grundriß einer normalen Haarnadel skizziert:



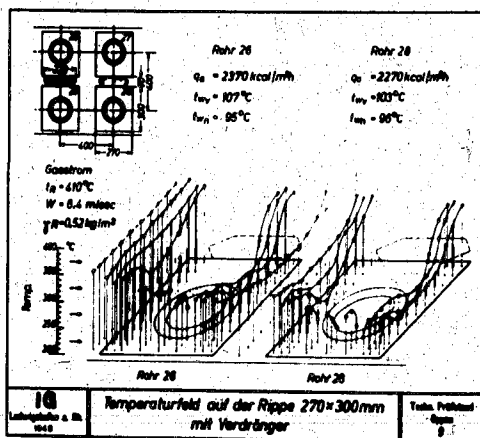
Es ist verständlich, hier zuerst die innere Rippe abzuschneiden bis zur quadratischen Rippe 270x270. Nach einem Vorschlag von Herrn Dipl.-Ing. Schappert und Herrn Dr. Wilde muß der freie Querschnitt durch einen Verdränger ausgefüllt werden, sonst würden die Rauchgase unbehindert durch die Gassenmitte strömen, ohne in die Rippenzwischenräume einzutreten. Diese Maßnahme erhöht nicht nur den Wirkungsgrad des inneren Rippensteiges, sondern nutzt gleichzeitig auch seine bessere Wärmeaufnahmefähigkeit durch die Erhöhung der Gasgeschwindigkeit zwischen den Rippen aus.

Als Übergang von der Normalrippe 270x320 zur quadratischen Rippe 270x270 wurde noch die Rippe 270x300 untersucht. Die Ergebnisse aller Messungen sind im folgenden Lichtbild dargestellt. Als Abszisse ist hier die äußere Oberfläche F_a für 1 m Rohrlänge aufgetragen. Als Ordinaten sind die pro 1 m Rippenrohrlänge übertragbaren Wärmemengen Q aufgetragen, wobei für alle Fälle die α_a -Werte bei einer Rauchgasgeschwindigkeit von 8 m/sec vor den Rohren gewählt wurden. Man erkennt die außerordentliche Überlegenheit der Verdrängeranordnung, die gegenüber dem Normalrohr eine maximale Mehrleistung von etwa 12% ergibt. Von den beiden gleichwertigen Rippen 270x270 und 270x300 ist letztere wegen ihres wesentlich kleineren Druckabfalles zu bevorzugen. Die Gewichtsersparnis gegenüber der Normalrippe würde 6% betragen. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde die Rippe 270x300 mit Verdränger als günstigste Rechteckrippe erkannt und für die Spitzenvorheizer einiger neuer Werke, insbesondere Oberschlesien, eingeführt.



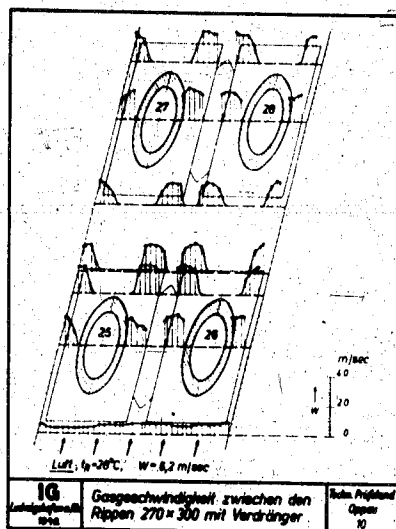
Einen Einblick in die Wärmeströmungen der Rippe bieten auch die Messungen der Rippentemperaturen. Ein solches Temperaturbild sei für die Rippe 270x300 mit Verdränger im Lichtbild gezeigt. Die Messungen erfolgten mittels eines Thermoelementes, das auf einem Kupferplättchen aufgelötet war. Das Element war durch ein Röhrchen gelegt und konnte seitlich durch einen Spalt in die Gasse eingeführt werden. Im Bild ist über den

jeweiligen Meßpunkten die Rippentemperatur von 200°C ab gerechnet als senkrechte Strecke abgetragen. Vor dem ersten Rohr (Nr.26) ist die Gastemperatur über dem Gassenquerschnitt konstant. Denselben Temperaturverlauf zeigt auch die vordere Rippenkante. Hinter dem ersten Rohr ist das Gas im Rohrschatten stärker abgekühlt als an den seitlichen Durchgängen, die noch unabgekühlte heiße Gase durchlassen. Einen entsprechenden Verlauf zeigt wieder die Vorderkante des zweiten Rohres. Auf der Rippe selbst ist natürlich von allen Seiten her ein starkes Temperaturgefälle zum Hochdruckrohr hin zu beobachten. Zu beachten ist noch das Temperaturfeld auf den Rippenecken. Die vordere innere Ecke des ersten Rohres ist eine Fläche fast gleicher Temperatur, d.h. also ohne Anteil an der Wärmeübertragung. Die hintere innere Ecke dagegen zeigt ein starkes Temperaturgefälle senkrecht zur Gasströmung. Dasselbe gilt für die vordere und hintere Ecke des zweiten Rohres. Die Ecken sind also als seitliche Wärmefühler anzusehen, die die Wärme aufnehmen und seitlich den Rippenflächen vor und nach dem Rohr zuleiten, von wo aus der radiale Wärme fluß zum Rohr einsetzt. Es wäre demnach nicht statthaft, die Rippenecken abzuschneiden. Vielmehr bilden diese einen wertvollen Anteil an der Wärmeübertragungsfläche.

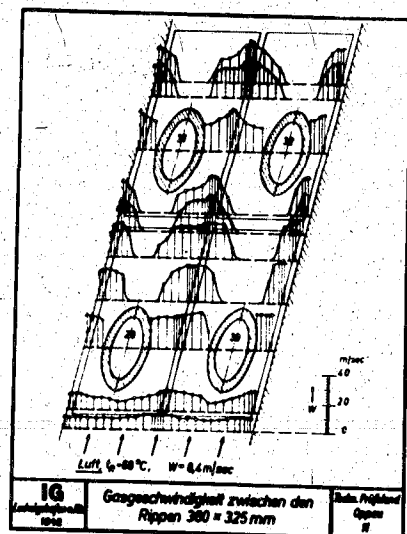


+) ausgenommen die vordere innere Ecke

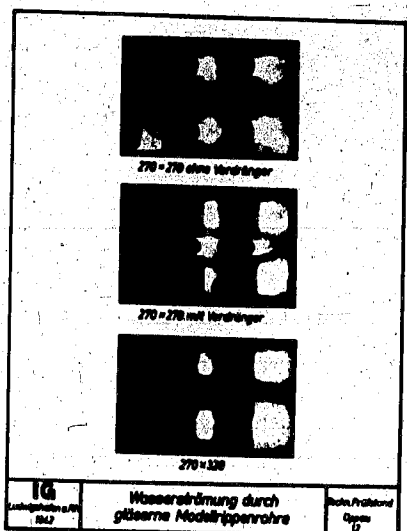
Es wäre nun eigentlich zu erwarten gewesen, daß der Wärmefluß von den Ecken aus direkt radial zum Rohr strömen würde. Eine Erklärung für das abweichende Verhalten lieferte die Kenntnis der Gasströmung in der Gasse. Mit einem dünnen Pitotrohr wurde die Gasgeschwindigkeit zwischen den Rippen in verschiedenen Querschnitten gemessen. Die Ergebnisse seien im folgenden Bild gezeigt. Die Rippenrohre sind in perspektivischer Darstellung gezeichnet, wobei das Tiefenmaß verdoppelt ist. Die Rauchgasgeschwindigkeiten sind an jeder Meßstelle als senkrechte Geraden eingezeichnet. Die ankommenden Rauchgase zeigen im Gassenquerschnitt einige kleine Unterschiede in der Geschwindigkeit, die bei solch einer Apparatur unvermeidlich sind. In den engsten Stellen zwischen Verdränger und Rohr erhöhen sich die Geschwindigkeiten auf den etwa dreifachen Betrag, entsprechend der Querschnittsverringerung. Diese Geschwindigkeitsspitzen bleiben nun auch nach den Rohren trotz der großen Querschnittserweiterung bestehen, sodaß die ganze Rippenfläche hinter den Rohren nicht von Gas gespült wird und natürlich daher einen schlechten Wärmeübergang aufweist. Diese Flächen werden vom Rohr gekühlt, dagegen die seitlichen Flächen von den nebenan durchgeströmten heißen Gasen intensiv erwärmt, wodurch der merkwürdige Wärmefluß quer zur Gasströmung entsteht.



Grundsätzlich dasselbe Bild ist auch bei den verdrängerlosen Haarnadeln, z.B. der Mammutrippe vorhanden. Hier erweitern sich die Geschwindigkeitsprofile etwas nach den Rohren, ein breiter Strömungsschatten bleibt aber trotzdem erhalten. Beachtenswert ist noch die Geschwindigkeitsspitze im mittleren Spalt zwischen den Rippen.- Um die Geschwindigkeitsmessungen zu kontrollieren, wurden die einzelnen Profilflächen planimetriert und unter Berücksichtigung von Druck und Temperatur die jeweilige Gasmenge errechnet. Diese stimmte in allen Querschnitten sehr gut mit unserer Blendenmessung überein.



Schließlich seien noch einige Bilder gezeigt, bei denen die Gasströmung in einem Glas-Modell von 3,6-facher Verkleinerung mit gefärbter Wasserströmung veranschaulicht ist. Die Ähnlichkeit in Bezug auf gleiche Reynoldszahlen ist allerdings nicht vorhanden, da die Wassermenge zu klein war. Im obersten Lichtbild ist das quadratische Rippenrohr 270x270 ohne Verdränger photographiert. Man erkennt sehr gut den mittleren Gasstrom der in die Rippen eindringt. Mit Verdrängern bilden sich beiderseits die Gasstrahlen kräftig aus. Im untersten Bild ist die Strömung am normalen Rippenrohr gezeigt.



In allen drei Fällen erkennt man als helle Stellen die Doppelwirbel hinter den Rohren als Flächen schlechter Gasbespülung.

Ich habe in meinen Ausführungen nur einen Teil aus unserem umfangreichen Versuchsprogramm vortragen können. Neben den Rechteckrippen wurden noch spiralförmig aufgewickelte und verschweißte Rippen bei verschiedener Spiralensteigung, verschiedener Rippenstärke und verschiedener Schweißung untersucht. Ferner kamen Konstruktionen zur Prüfung, bei denen das Schweißen ganz vermieden werden sollte, z.B. Rippen, deren Loch einen umgebördelten, federnd geschlitzten Rand besitzt, oder auch Rippen, die mittels eines Weich-eisenringes auf das Rohr aufgestemmt sind. Schließlich wurden noch unberippte Hochdruckrohre mit Führungsblechen sowie unberippte Hochdruckrohre in der Anordnung eines versetzten Rohrbündels hinsichtlich ihres Wärmeüberganges geprüft. Insgesamt wurden 32 verschiedene Hochdruckrippenrohre untersucht.

Auf alle diese Versuche kann ich aus Zeitmangel nicht näher eingehen. Es liegen jedoch hierüber mehrere Berichte von mir vor. - Ich hatte mich hier auf die geschweißte Rechteckrippe beschränkt, um diese Versuche in genügender Ausführlichkeit besprechen zu können. Dabei hoffe ich, Ihnen den Eindruck vermittelt zu haben, daß auch ein einfach erscheinendes Wärmeübergangsproblem mancherlei interessante Vorgänge in sich birgt und daß auch aus einem lang-jährig praktisch erprobten und als gut befundenen Wärmeaustauscher durch intensive Untersuchung noch einige kostbare Prozente mehr Wärmeleistung herauszuholen sind.

Ch. Ring