

SUMMARY OF REPORT No. 11/24

The following measures should be applied to avoid damage to heat exchangers made from seamless and welded tubes:

- 1) Welding <sup>(for connections)</sup> should be avoided
- 2) Seamless tubes are to be preferred
- 3) Care should be exercised in making weld connections to the head etc. Heat treatment after welding should be carried out very carefully.
- 4) No objection is to be made against material of increased scale resistance provided that the sensitivity of the alloy used is not unduly increased. The use of steels with increased scale resistance is not justified by experiments.

1928 A - 46

460000275

460000276

1928 A - 46

Inhalts - Verzeichnis

Aktenvermerk Nr. 11/44

<u>Pos.</u>		<u>Seite</u>
c)	Prüfauftrag Nr. 243 287 Luftwärmeaustauscher der Saargasspaltanlage <u>Op</u>	1
b)	Prüfauftrag Nr. 243 303 Synthesegas-Sauerstoff-Wärmeaustauscher der Anlage <u>Waldenburg</u>	4
c)	Prüfauftrag Nr. 243 252:	
	1) Gas-Wärmeaustauscher der Gasspalt-Anlage <u>Linz</u>	5
	2) Luft- (bezw. Sauerstoff-) Wärmeaustauscher <u>Linz</u>	8
	<u>Bemerkungen zur Frage der Ausführung:</u>	
1)	der <u>Rundschweißen</u> in freier Rohrlänge und der <u>Befestigungsschweißen</u> am Rohrboden	9
2)	der <u>Einschweißnähte</u> am Rohrboden	10
	<u>Überwachung der Fertigung</u>	11
	<u>Zusammenfassung</u>	13

Entwurf!Aktenvermerk Nr. M/44

**Betreff:** Schäden an Luft- bzw. Gas-Wärmeaustauschern,  
Bauart Rekuperator K.G., Düsseldorf.

Nachstehend wird zunächst über die bisher im obigen Zusammenhang durchgeführten Werkstoffuntersuchungen berichtet:

a) Prüfauftrag Nr. 243 287 Luftwärmeaustauscher der Saargasspaltanlage  
Op.

Kennzeichnung der Apparatur:

Nahtlose FF 6 N-Rohre, also ohne Längs- und ohne Rundschweißen in der freien Länge. An einzelnen Rohren Nasen in Längsrichtung als Schikanerblechhalterung angeschweißt.

Beaufschlagung:

Um Rohre Synthesegas ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ), in Rohren Luft (ohne Zusatz von Sauerstoff, etwas Wasserdampf).

Aufheizung der Luft auf etwa  $640^\circ\text{C}$ ; Eintrittstemperatur des heißen Gases nicht über  $840^\circ\text{C}$ . Heißester Teil oben. Rohrwandtemperatur etwa  $720^\circ\text{C}$ ; <sup>keine</sup> Rußbläser nicht angeordnet. Beim Abstellen verschiebt sich die Temperatur in der Art, daß der untere kältere Teil wärmer, der obere heiße Teil kälter wird.

Betriebszeit:

Der Apparat war von etwa März 1942 bis Mitte 1943 (17 Monate) ununterbrochen im Betrieb. Nach einer Betriebsunterbrechung, wie sie in letzter Zeit mehrfach vorkamen, trat ein Brand ein, der den Rohrwerkstoff zum Teil zum Schmelzen brachte. Im Bereich der Rohrböden waren die Rohre noch unversehrt. Die Rekuperator K.G. kennzeichnet im Schreiben vom 31.7.1943 an Linz den Schaden wie folgt: "Die Rohre waren im vorderen Teil des Rekuperators, wo das heißeste Gas eintritt, von oben bis unten vollständig in Ordnung und gerade nur im hinteren Teil waren sie im oberen Drittel verbrannt."

Befund bei Besichtigung nach dem Brand:

Fehlstellen wurden an den Rohren nicht festgestellt.

Am oberen Rohrboden wurden alle Rohrenden der Tüpfelprobe unterzogen, um festzustellen, ob etwa ein hochlegierter, zu starker Versprödung neigender Cr-Stahl vorliegt, oder ob eine Werkstoffverwechslung mit einem nieder legierten, unzureichend zunderbeständigen Stahl stattgefunden hatte. Nach dem Ergebnis der Tüpfelprobe findet der Verdacht, daß ein Rohr aus einem wesentlich anderen Stahl als FF6 N vorlag, keine Stütze.

Die Rohre waren in die Rohrböden eingeschweißt. Am oberen Ende war die Arbeit verhältnismäßig gut ausgeführt, während am unteren Ende an zahlreichen Stellen Löcher in die überstehenden Enden eingebrannt waren. Die Dichtigkeit der Apparatur wurde aber offensichtlich hierdurch nicht berührt.

Bei der Untersuchung des Rohrwerkstoffes wurden keine Anhaltspunkte gefunden, welche auf eine unerwartet starke Zunderung des Stahles oder eine andere ungünstige Beeinflussung durch den Betrieb schließen ließen:

Im Bereich einer (austentisch) angeschweißten Schikanenblechhalter-nase wurde die Brinellhärte einheitlich über den ganzen Rohrquerschnitt zu etwa 180 (174-188) festgestellt. Unter der Schweißraupe war der Stahl etwas grobkörnig geworden. Risse wurden nicht festgestellt. Um aber jede Unsicherheit in dieser Richtung künftig auszuschalten, wurde vorgesehen, die Nasen künftig an blind gemachten Rohre aus einem Stahl <sup>von</sup> entsprechend hoher Hitzebeständigkeit anzuschweißen. Eine besondere Sprödigkeit des Stahles wurde nicht beobachtet. Das Ergebnis der Prüfung von Schlagfaltringproben streute zwar etwas

Zusammenfassend ist zu sagen:

Der Stahl der Kruppmarke FF6 N hat bezüglich seiner Zunderbeständigkeit befriedigt. Die Rohre zeigten eine einwandfreie Beschaffenheit und sind ohne besondere Versprödung. Der Versuch, den Schaden und Brand durch Undichtheit eines Rohres zu klären, kann sich bis jetzt nicht auf einen Untersuchungsbefund des vorliegenden Falles stützen, sondern nur berufen auf die an sich grundsätzlich immer gegebene Möglichkeit des Vorliegens von örtlichen Rohrfehlern, die gegebenenfalls erst nach längerer Betriebszeit zur Auswirkung kommen, (vgl. V17 F-Rohre für Druckkonvertierung, Prüfungsbericht vom 23.9.1943, Auftrag Nr. 243 283). Für eine Vermutung der Art, daß eine momentane, dem Betrieb bisher unbekannte Einwirkung auf einen gewissen Bereich des Rohrwerkstoffes zum Brand führte, besteht bisher keine Stütze.

Nachtrag:

Am zerstörten Apparat wurden oben zwei Rohre gefunden, welche in gleicher Höhe unweit des Rohrbodens eine Durchbrechstelle als querlaufenden Spalt aufwiesen. Nach dem Schreiben Schie/Aldt/Op 631 N an Firma Rekuperator K.G., Düsseldorf, vom 3.12.1943 lag die Stelle genau gegenüber der Stelle, von der die Zerstörung des ganzen Bündels ausging. Beide Stellen lagen nicht direkt im Eingangsstrom des heißen Gases, sondern seitlich an den Längsnähten des Wärmeaustauschermantels. Zunächst hatten hier offenbar kleine Flämmchen längere Zeit herausgebrannt, ohne in der Umgebung Zerstörungen anzurichten. Schließlich wurde der Brandherd aber so vergrößert, daß die Umgebung stark verzünderte. Auch die undichten Rohre selbst zeigen in diesem Bereich eine sehr starke Verzunderung; der völlig durch und durch oxydierte Werkstoff konnte über einen Bereich von einigen Zentimetern links und rechts des Spaltes leicht mit einem Hämmerchen abgeklopft werden. Es ist möglich, daß dieser lokale Brand wesentlich zur späteren Zerstörung des Apparates durch den oben erwähnten großen Brand beitrug. Der querverlaufende Spalt der beiden Rohre entstand vermutlich aus einem zunächst feinen Anriß durch Zunderung, Erosion und wohl auch Zugrekung. Die zwei Rohre schienen an der Schadensstelle eine gewisse Einschnürung aufzuweisen.

Zur Erklärung des Lokalschadenfalles wurden verschiedene Vermutungen geäußert. Ursprünglich vorhandene Rohrfehlstellen können kaum angenommen werden, da es ganz unwahrscheinlich ist, daß zwei Rohre einer großen Lieferung an gleicher Stelle die gleichen und ungewöhnlichen Fehler aufweisen. Beschädigungen bei Montage bzw. beim Transport durch Biegung könnten wohl Querrisse zur Folge haben. Notwendig wäre jedoch hierzu spröder oder stark alterungsanfälliger Werkstoff bzw. eine nur kurze Knickung, deren Zustandekommen bei der großen Elastizität der langen Rohre nur schwer denkbar ist. Bei ungünstigem Werkstoffzustand könnten gegebenenfalls beim Zurückbiegen eines Knickes derartige Querbrüche entstehen. Wenn man die Brüche als Zeitstandsbrüche auffaßt, käme man zu der Anschauung, daß hohe Längszugkräfte an einer Stelle hoher Dauertemperatur die Werkstofffestigkeit überschritten haben.

~~Stausch~~ Die Möglichkeit besteht, daß fehlerfreier Rohrwerkstoff durch die Einwirkungen des Betriebes, insbesondere die mechanische Beanspruchung, zu Anrissen und Undichtheiten führt, muß zunächst dahingestellt bleiben, erscheint aber durchaus gegeben.

Von Interesse ist die Krupp'sche Angabe (mündlich, Mitte 1943), daß FF6 N-Stahl bei reduzierender und aufkühlender Atmosphäre nur bis 700°C als zunderbeständig angesehen wird.

Erwähnenswert sind noch die Vermutungen der Rekuperator K.G. (vgl. Schreiben TA/Mat an Herrn Dr. Sachse vom 25.11.1943). Dr. Schack nahm an, daß, wenn chromhaltiger Stahl mit siliziumhaltigem Isolierstein längere Zeit in Gegenwart von Wasserstoff in Berührung kommt, der Stahl infolge Einwanderung von Silizium unter Aufquellen zerstört wird. Dr. Schack bezog sich dabei auf Erfahrung in Ougree bei 700-850°C.

Im Materialprüfungsbetrieb wurde daraufhin ein FF6 N-Rohrstück 7 Tage bei 850°C in einer Tasche mit Kieselgur unter Leuchtgas ge-  
glüht. Eine Verzunderung des Werkstoffes wurde nicht festgestellt. Das Schreiben I.G. (TA/Mat) an Rekuperator K.G. vom 23.12.1943 berichtet über diesen Versuch; mit Schreiben I.G. (Schie/Aldt Op 631 N) vom 3.12.1943 wurde Schack mitgeteilt, daß einwandfreie Messungen ergeben haben, daß die Rohre der Wärmeaustauscher nicht an der siliziumhaltigen Ausmauerung angelegenhaben.

Ein weiterer Versuch mit der von Rekuperator K.G. verwendeten Isoliermasse läuft zur Zeit noch bei TA/Mat Lu.

b) Prüfauftrag Nr. 243 303 Synthesegas-Sauerstoff-Wärmeaustauscher  
der Anlage Waldenburg.

Kennzeichnung der Apparatur:

Nahtlose FF6 N-Rohre, 18/22,5 mm  $\phi$ , in Rohrböden eingeschweißt.

Beaufschlagung:

Im Inneren der Rohre reiner Sauerstoff, um die Rohre "Synthesegas mit etwa folgender Zusammensetzung (vgl. Schreiben Dipl.-Ing. <sup>3,8.43</sup> Altstaedt an Krupp vom 30 CO, 60 H<sub>2</sub>, 7 CO<sub>2</sub>, 3 N<sub>2</sub>)".  
Das Gas enthielt etwa 200 mg feinen Ruß, der sich auf den Rohren in etwa 1 bis 3 mm starker Schicht ablagerte und periodisch durch Blasen mit Gas entfernt wurde. Das Synthesegas enthielt ferner etwa 80 mg anorganischen Schwefel".

Betriebszeit:

Der Apparat war etwa ein halbes Jahr im Betrieb und wurde dann, ohne daß Schäden aufgetreten waren, "aus betrieblichen Gründen" stillgelegt.

I.G.

Rohrproben, die zur Untersuchung nach Lu und an Fried. Krupp A.G., Essen eingesandt wurden:

a) Aus heißem Bereich:	575°C	mittlere Wandtemperatur	"Oben" x)
b) " mittlerem Bereich:	350°C	" "	"Mitte"
c) " kaltem Bereich	125°C	" "	"Unten"

Befund der Werkstoffuntersuchung Lu:

1) Vickershärte auf Stirnfläche mit Testor ermittelt:

Oben	213	213
Mitte	203	206
Unten	206	202

2) Ringfaltproben. Die Proben ließen sich von allen drei Probenentnahmestellen sowohl bei langsamer als auch bei schneller Verformung, ohne Anrisse zu zeigen, zusammenquetschen.

3) Metallographische Untersuchung. Die bei den Akten des Materialprüfungsbetriebes Lu sich befindende Bildtafel (Bilder Nr. 28309, 10 und 11) zeigt, daß das Gefüge als normal anzusprechen ist.

x) Innentemperatur etwa 475°C

Außentemperatur ~~(Synthesegas)~~ (Synthesegas) etwa 700°C.

Zusammenfassung:

Der Werkstoff liegt in einwandfreier Beschaffenheit vor. Hinweise auf eine Schädigung des Werkstoffes durch die Einwirkung des Betriebes wurden nicht gefunden.

Der Umstand, daß eine Versprödung des Werkstoffes von uns nicht festgestellt wurde, wurde ~~hermit~~ Herrn Dr. Sachsse Op bereits mit Schreiben vom 16.8.1943 mitgeteilt. Dieser Befund steht im Gegensatz zu dem im Schreiben vom 31.7.1943 der Rekuperator K.G., Düsseldorf, an die Stickstoffwerke Ostmark A.G. zum Ausdruck gebrachten Auffassung, "daß eine ganz besonders starke Versprödung der Rohre in einem bestimmten Temperaturbereich stattgefunden haben muß".

Zu den auf die Frage der Sprödigkeit des FF6 N-Stahles abhebenden Berichten der Materialprüfung der Stickstoffwerke Ostmark äußerten wir uns ebenfalls im oben erwähnten Schreiben vom 16.8.1943 an Herrn Dr. Sachsse.

c) Prüfauftrag Nr. 243 252 Gas-Wärmeaustauscher der Gasepalt-Anlage Linz

1) Gaswärmeaustauscher.

Kennzeichnung der Apparatur.

Koksgas in den Rohren und um die Rohre. Längsgeschweißte Rohre, im heißen Teil aus Sicromal 10-Stahl (18 Cr), im <sup>kälteren</sup> ~~kälteren~~ Teil Furodit 8-Stahl (6 Cr, 1,5 Si).

Rohrabmessungen siehe unten.

Die Rohre der zwei Stähle sind in halber Höhe des Apparates durch einen autogen ausgeführten Rundschweiß (Zusatzwerkstoff NCT5 oder NCT1) verbunden.

Die im Betrieb aufgetretene Temperaturen haben nach Angabe bis zu 850°C betragen, für den Bereich der Schweißnaht schwanken die Schätzungen der aufgetretenen Temperaturen ~~zwischen~~ zwischen etwa 500°C einerseits und 600 - 700°C andererseits.

Beschreibung des Schadensfalles:

Abstellung war notwendig gegen Ende des Anheizvorganges nach vier-tägigem Betriebsstillstand. Eine Anzahl Rundschweißen rissen ab (plötzlich an 500 Rohren!?). Nach Abreißen der Schweißen trat Brand ein, offenbar durch Sauerstoffzutritt. (Weitere Einzelheiten siehe Bericht Materialprüfung Linz Nr. 243016 vom 17.7.1943 .)

Ergebnis der Untersuchung:

Über das Ergebnis der Gefügeuntersuchung liegt der Bericht des Materialprüfungsbetrieb Lu vom 14.7.1943 vor. Auffallend war, daß die Rundschweißen auf der Seite des martensiti-schen Furodit 8-Stahles und nicht des ferritischen Sicromal 10 - Stahles gerissen waren. Die beim Schweißen eintretende Grobkornbildung ist beim letzteren Werkstoff nicht mehr regenerierbar, während sie beim erstgenannten Stahl durch eine geeignete Wärmebehandlung hätte beseitigt werden können. Leider standen von den Schweißen nur die aus den Bildern des Berichtes vom 14.7.1943 ersichtlichen Abschnitte zur Verfügung, nämlich Sicromal 10-Rohrabschnitte mit den zugehörigen Rundschweißen, während von dem anschließenden Teil der Furodit 8-Rohre nichts miteingeliefert war. Vielleicht war für den Umstand, daß die Schweiße auf der Furodit 8-Seite riß, die starke Versetzung der Rohre und die ungleichen Abmessungen derselben entscheidend. An unbeschädig-ten Rohrenden wurden von uns folgende Maße festgestellt:

<u>Sicromal 10</u>	<u>Furodit 8</u>
26,6/27,3 mm Ø, 1,5 Wand	24,9/26,3 mm Ø, 1,8 mm Wand
25,8/27,3 " " 1,5 "	25,1/27,0 " " 1,7 " "
25,5/27,5 " " 1,5 "	25,1/26,8 " " 1,8 " "
25,5/27,7 " " 1,5 "	24,3/26,9 " " 2,0 " "
26,3/27,3 " " 1,5 "	25,3/27,2 " " 1,6 " "

An dem unmittelbar unter der Austenitschweiße sich befindenden Rest-stück des Furodit 8-Rohres war eine besondere Härtung des Werkstoffes nicht festzustellen. Offen steht jedoch die Frage, inwieweit eine solche Härtung zunächst vorlag, aber durch die Dauereinwirkung des Betriebes gemildert bzw. des Brandes beseitigt wurde.

Über eine Besprechung bei der Reichsstelle für Eisen und Metalle bzw. beim Arbeitsstab für Metallumstellung liegt uns folgende Notiz vor: "Zugegeben wurde von Herrn Dr. Braun, daß die NCT5-Schweiße nicht mehr metallisch war. Strittig blieb die Ursache der Zerstörung, ob aufkohlung bei 600-700°C in Anwesenheit von CO und atomarem Kohlenstoff oder Verzunderung durch H<sub>2</sub>O-Zersetzung."

Nach dem Ergebnis unserer Untersuchung ist sowohl der Werkstoff der Schweißnaht als auch des anschließende Rohrwerkstoffes noch durchaus metallisch. Durch die Einwirkung der Gasflamme beim Brand war der Werkstoff jedoch mit einer starken ~~Hydratisierten~~ Oxydkruste behaftet.

Eine Aufkohlung der Austenitschweißnaht ist weder beim Schweißen noch im Betrieb eingetreten.

Aufbohrproben von einigen der längsgeschweißten Sicromal 10-Rohren ergaben folgende Werte:

Bezeichnung der Probe:		Prozentuale Aufweitung des Innendurchmessers bis zum Bruch
C 1		12,3
C 2		14,2
C 3		13,1
C 4		15,6
C 5		5,8

Der Bruch der Proben erfolgte durchweg unmittelbar neben der Längsschweißnaht. Bei der Probe C1, C2, C3 und C5 war dementsprechend das Bruchkorn ziemlich grob. Bei Probe C5 lag ein verhältnismäßig schroffer Querschnittsübergang vor. Die Längsschweißungen waren mit ~~offenbar artglei-~~chem Zusatzwerkstoff ausgeführt.

Der oben erwähnte Bericht der Materialprüfung Linz vom 17.7.1943

kommt zu folgendem Ergebnis:

Das Rußblasen mit Kaltgas hat, selbst wenn Wassertröpfchen auf die heißen Rohre eindrangen, keine Gefügeschädigung hervorgerufen, es gibt aber Veranlassung zu einseitigen Spannungen und kann dadurch ein die Zerstörung auslösender Faktor gewesen sein.

Von Schweißproben, die mit Gasüberschuß und Überhitzung ausgeführt wurden, wurden unter anderem Zerreißproben bei 20°C geprüft; die Proben rissen teilweise vom Übergang der Austenitschweißnaht zum Fügeteil.

Aus dem spröden Bruch der Betriebsrohre wird vermutet, daß sich Anrisse bereits unterhalb einer Temperatur von 400°C gebildet haben.

Bei einer Besprechung mit Rekuperator K.G. in Op 648 am 4.6.43 kam man überein, für weitere Apparate entweder FF15 geschweißt mit FF13 zu verwenden oder FF18 (Sonderschmelze) über ganze Länge ohne Naht. Stahl mit hohem Cr-Gehalt ist erwünscht zur Verhinderung von Kohlenstoffabscheidung.

Aus Beobachtungen des Reservebündels wird geschlossen:

Die Rundschweißen zeigen zum Teil durch wenig sorgfältige Arbeitsweise Versetzungen. Es ist anzunehmen, daß mit großem Brenner und Gasüberschuß (Gefahr der Aufkohlung) geschweißt wurde, um Arbeitsvereinfachung und Leistungssteigerung zu erzielen.

Viele Rohrüberstände sind durchgebrannt und abgerissen.

Es wird vorgeschlagen, möglichst nahtlose Rohre zu verwenden, mindestens aber Rundnähte zu vermeiden.

"Die exakte Beantwortung der Frage, welche Umstände letzten Endes den Schaden ausgelöst haben, ist nicht mehr möglich".

Die Auffassung von Lu ist, daß das Abreißen der Rohre an den Einschweißstellen nicht, wie im Bericht Linz angegeben, durch die Betriebsbeanspruchung erfolgt, sondern meist schon in der Werkstätte, bzw. bei Transport und Montage. Soweit die gerissenen Betriebsrohre geprüft werden konnten, wurde eine Aufkohlung im Schweißübergang nicht gefunden.

2) Luft- (bzw. Sauerstoff-) Wärmeaustauscher Linz.

Kennzeichnung der Apparatur.

Nahtlose Rohre der Abmessung 22x2 mm aus FF6 N-Werkstoff.

Um die Rohre <sup>Luft</sup> ~~Koks~~ gas, in den Rohren Luft (bei einigen Anlagen zusätzlich mit dosiertem Sauerstoff) <sup>(37% O<sub>2</sub>)</sup>

Anordnung im ~~KANAL~~ Gegenstrom.

Temperatur:

Heizgasseitig etwa 850-450°C, gemessener Monatsdurchschnitt des Spaltgases 885°C, Aufheizung auf 670°C.

Wandtemperatur an heißester Stelle höchstens 790°C, in halber Rohrlänge etwa 600°C.

Rußbläserrohre bliesen in Mitte der Rohre alle 4 Stunden 25°C kaltes Gas ein, das gegebenenfalls etwas Wasser mit sich führen und abschreckend wirken konnte.

Wasserschlag wird bezüglich der Herbeiführung des Schadensfalles von der Rekuperator K.G. als unwahrscheinlich bezeichnet.

Beschreibung des Schadensfalles:

Brand mit teilweisem Schmelzen des Stahles nach etwa zwei Monaten

Betriebsdauer. (Weitere Einzelheiten siehe Materialprüfung des

Arbeits-  
Werkes Linz Nr. 243017 vom 17.7.1943 .) Stutzen soll rotglühend geworden sein.

Ergebnis der Werkstoffuntersuchung:

Die uns zugesandten Rohrabschnitte stammten, teils aus den freien Rohrsträngen, teils aus der Nähe des Rohrbodens. Von der ersten Gruppe waren einige Abschnitte durch den Brand und teils mit einer stark oxydischen Kruste behaftet, angeschmolzen.

Durch Tüpfelung wurde nachgewiesen, daß 6-prozentiger Cr-Stahl vorliegt.

Aufdornproben ergaben folgende Werte der prozentualen Aufweitung, bezogen auf den Innendurchmesser:

Bezeichnung:	B2	26,9 %	) Die Rohrabschnitte erwiesen sich fehlerfrei und zeigten gutes Verformungsvermögen.
	B3	28,7 %	
	B4	26,4 %	

Der Bericht der Materialprüfung Linz Arbeits-Nr. 243017 vom 17.7.1943. kommt zu folgendem Schluß:

Bei einer Besprechung in Op 648 am 4.6.1943, mit Rekuperator K.G. kam man überein, einen Betriebsversuch mit FF13-Stahl anzustreben.

Abschrecken beim Rußblasen bewirkt keine Versprödung des Stahles, aber Spannungen.

Eine Überhitzung durch zu hohe Betriebstemperatur am Gaseintritt hat nach Betriebsaufzeichnungen nicht stattgefunden.

Das Gefüge der FF6 N-Rohre zeigte Unterschiede, teils feines ferritisch-perlitisches Gefüge, teils als grob "angesprächene ferritische Körner" mit einer Art Perlenschnur, wie sie bei verbranntem Werkstoff vorzufinden sind. Sämtliche Proben ließen sich jedoch um 180° biegen, erst beim Rückbiegen zeigten sich Unterschiede ("sprödes Verhalten").

"Es muß angenommen werden, daß hier ein fehlerhafter Rohrwerkstoff vorliegt, außerdem weist die Rohrrinnenfläche Oberflächenfehler auf."

"Es ist anzunehmen, daß sich in den Anrissen keine zusammenhängend schützende Zunderschicht gebildet hat und dadurch im weiteren Verlauf des Betriebes zu einem Tiefergreifen der Einkerbungen und schließlich zum Ausreißen eines Rohres führt. Bei der gewählten Rohrteilung liegt es im Bereich der Möglichkeit, daß beim Aufreißen eines einzigen Rohres ein Nachbarrohr von einer Stichflamme erfaßt wird, die weiteren Rohre beschädigt und schließlich auf das ganze Rohrbündel übergreift." Sorgfältige Abnahmeprüfung der Rohre wird empfohlen. "Für einen Wechsel im Rohrwerkstoff liegen keine Anhaltspunkte vor. Doch müßte durch eine Mikro-Untersuchung an einer gewissen Anzahl von Rohrabschnitten, sowie durch chargenweise Analyse der Werkstoffe die richtige Verarbeitung überprüft werden."

Lu kommt aus dem Befund Linz nicht zu dem Eindruck des Vorliegens von fehlerhaftem sprödem Werkstoff. Unterschiede der einzelnen Schmelzen hinsichtlich Verarbeitung und Zähigkeit sind bekannt und wurden vom Hersteller zugegeben. Bezüglich Abnahmeprüfung, hat Lu mit Fa. Mannesmannröhren-Werke verhandelt.

Bemerkungen zur Frage der Ausführung der Rundschweißen in freier Röhrlänge und der Befestigungsschweißen am Rohrboden.

1) Der oben unter c/1) geschilderte Fall des Reißens der Rundschweißen, mit welchen die aus zweierlei Stählen bestehenden Rohre in halber Länge zusammengesetzt waren, gab Veranlassung zu eingehenden Besprechungen mit der Firma Rekuperator K.G. Die erste derselben erfolgte am 22.5.1943 im Haus der Sicromal-Abteilung der Firma Deutsche Röhrenwerke A.G. im Beisein von Dr. Class und Dr. Gering. Weitere Besprechungen unter Mitwirkung des Materialprüfungsbetriebes Lu fanden in Op und Lu statt. Unter anderem sei hingewiesen auf den Aktenvermerk des Materialprüfungsbetriebes Nr. 22/43 vom 31.8.1943. Eine Zusammenstellung der wichtigsten Gesichtspunkte enthält die Aktennotiz Nr. 3557 der Rekuperator K.G. vom 11.8.1943 (Anlage zum Schreiben der Rekuperator K.G. an Lu vom 13.8.1943). Die Anlage enthält eine Abschrift dieses Aktenvermerkes. Im Schreiben der Rekuperator K.G. an Lu vom 7.9.1943 wird ergänzend mitgeteilt: "

"Nach den übereinstimmenden Erfahrungen der Versuchsanstalten der Vereinigten Stahlwerke, Deutsche Röhrenwerke, Düsseldorf, und von Krupp, Essen, ist eine Glühung bei 850°C bereits zu hoch in der Temperatur. Nach den ganz bestimmten Auskünften ist eine Temperatur zwischen etwa 720 und 780°C das Richtige. Die Glühzeit soll mindestens 15 Minuten betragen. Da wir auf diese Forderung bei der Konstruktion unseres Glühofens nicht genügend geachtet haben, haben wir einen neuen Ofen entworfen, der in dieser Woche in Benrath fertig wird. Wegen der langen Glühzeit müssen nämlich jeweils etwa 10 Rohre gleichzeitig im Ofen sein, damit keine untragbaren Zeitverluste entstehen."

Bei der praktischen Ausführung der Schweißen erweisen sich die austenitischen Schweißdrähte angenehmer als die ferritischen.

Über die Unterschiede beim Schweißen von Eurodit 8- & Sicromal 10- Stahl mit oxydierender, neutraler und reduzierender Flamme macht auch der Bericht

Linz von Arbeits-Nr. 243 017 v.17.7.43 einige Angaben.

2) Über die Ausführung der Einschweißnähte am Rohrboden, neben denen besonders im Bereich der <sup>Krempung</sup> ~~Krempung~~ der Rohrböden mehrfach Risse eingetreten waren, fanden ebenfalls mehrere Besprechungen statt. Angaben über die "alte" Ausführung und die neuen Abänderungsvorschläge macht die Aktennotiz des Herrn Dipl.-Ing. Altstaedt, Op 229, vom 16.8.1943, unter dem Stichwort Gaswärmetauscher He 282. Es wird hier die Auffassung vertreten, daß die Risse bereits bei Montage durch Schlagbeanspruchung (beim Einbringen der Isolierung) eintraten. Begründet wird die Auffassung

"Auch bei der Lieferung des dritten Wärmetauschers stellte sich heraus, daß im heißen Zug verschiedene Rohre gerissen waren. Dasselbe war schon beim zweiten Wärmetauscher der Fall. Die Anrisse waren im heißen Rohrboden neben der Schweißnaht, und zwar waren vorwiegend solche Rohre gerissen, die in der Bodenkrempe lagen (22 Stück). Dagegen waren im ebenen Teil des Bodens fast keine Rohre gerissen. Die Risse sind nicht erst während des Transportes aufgetreten. Durch die Risse war weißliche Flüssigkeit hindurchgelaufen. Hieraus kann geschlossen werden, daß die Risse schon in der Werkstatt vorhanden waren bzw. durch Beschädigungen beim Einbringen des Isoliermaterials entstanden sind. Von diesem Tatbestand konnten sich sowohl der Montageingenieur der Rekuperator Ing. Trebbe, wie auch der zur Reparatur entsandte Schweißer der Demag überzeugen. Der Demag-Schweißer gab an, daß die Rohre nach dem Einschweißen einzeln geprüft wurden und darnach das Einfüllen der Isoliermasse erfolgt. Da beim ersten gelieferten Wärmetauscher keine Risse vorhanden waren, vermuten wir, daß durch sorgfältigeres Einfüllen diese Beschädigungen weitgehend vermieden werden können. Wahrscheinlich ist aber die Ausführung dieser Kehlnaht Ursache von erheblichen Spannungen in den Rohren, die im Zusammenhang mit der Gefügevergrößerung neben der Schweißnaht bei der geringsten Schlagbeanspruchung Risse entstehen läßt. Da die Rohre mit erheblichem Spiel (etwa 1 mm) durch den Boden geführt sind, entstehen beim Schrumpfen der Schweißnaht erhebliche Querspannungen, bei den Rohren in der Krempelung des Bodens Quer- und Längsspannungen, die das spröde Rohr verformen.

Schon bei den nächsten Apparaten muß das Einschweißverfahren geändert werden, indem entweder verstärkte Hülsenrohre in die Böden eingesetzt werden, wie es schon mit der Rekuperator H.G. besprochen ist, oder die Kehlschweißung muß durch eine Stirnschweißung ersetzt werden."

Art der Lagerung der Würfel

Würfelstärken nach:

Nr.	13 Tagen	17 Tagen	28 Tagen
5429			136
5584			141
5597			162
Mittel			146

Die Würfelstärken müssen mindestens sein:

Handelszement	Wb 28	120 kg/cm <sup>2</sup>
Hochwertig.Zement	Wb 28	160 "
	Wb 7	Wb 28 . 70
		100

Unterschrift: gez. Schaaf.

Für die Rohrböden wird der Stahl CMT 5 (Mn-Cr-Austenit) in Aussicht genommen, soweit hohe Dauerstandfestigkeit erforderlich ist. Eine von der Firma Rekuperator K.G. ausgeführte Probeschweißung: Bodenblech / Kehlnaht / rohrförmige Manschette / Rohr aus Sicro-mal 10, mit NCT 3 geschweißt, wurde von der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt Duisburg untersucht. Hierüber liegt ein Bericht vom 11.9.1943 vor. Die genannte Versuchsanstalt empfiehlt Anwendung der Lichtbogenschweißung mit 3 mm Elektroden und Entspannungsglühung bei 650-680°C mit langsamen Hochheizen, etwa 45 Minuten Haltezeit und einer Abkühlungsgeschwindigkeit, die nicht höher als etwa 40°C/min sein sollte. Autogenachweißung würde eine breite Einflußzone mit Grobkornbildung bewirken. Die untersuchte Schweißverbindung wird wie folgt beurteilt:

"Sie ist aus dreifachen Gründen spröde: durch die Grobkornbildung infolge Erwärmung des anteiligen Werkstoffbereiches bis in die Nähe des Soliduspunktes, infolge Korngrenzensubstanzen (vermutlich FeCrC-Verbindung) und infolge Grobkornbildung durch Rekristallisation. Gefährdet ist sie durch die hohen latenten Schweißspannungen."



Da auch bei nahtlosen Rohren eine hochwertige Ausführung sichergestellt sein muß und insbesondere lokale Fehlstellen, die zu Undichtheit und dadurch zu einem Brand führen können, vermieden werden müssen, wurde bei einer Verhandlung mit Herrn Prokurist Dipl. Ing. Linden der Hauptverwaltung der Mannesmannröhren-Werke am 8. Oktober 1943 abgesprochen, daß für die neuen Bestellungen vom Besteller aus Abnahmeprüfung durch die I.G. vorgeschrieben werden soll. Die Einzelheiten der Sondermaßnahmen für Herstellung und Prüfung würden dann zwischen der Werkstoffabteilung der Hauptverwaltung von Mannesmannröhren-Werke und unserem Materialprüfungsbetrieb Lu vereinbart werden.

Zusammenfassung:

Verschiedene Schadensfälle an Wärem austauschern aus nahtlosen und längsgeschweißten Röhren gaben Veranlassung, eingehend nach der Schadensursache zu suchen. Hierbei wurden von den beteiligten Stellen eine Reihe von Möglichkeiten ins Feld geführt. So wurde bei den längsgeschweißten Röhren das Vorliegen von erheblichen Ausführungsfehlern erwähnt, bei den nahtlosen Röhren wurde der Verdacht einer Perforation geäußert, etwa derart, daß lokale Fehlstellen erst im Laufe der Zeit, vielleicht unter Mitwirkung einer gewissen Abzunderung, zur Auswirkung gekommen seien.<sup>1)</sup> Es wurde dem Stahl ungenügende Zunderbeständigkeit zur Last gelegt und die Forderung nach einem höher legierten Stahl erhöhter Zunderbeständigkeit ausgesprochen. Ein Beweis, daß die Zunderbeständigkeit der bisher verwendeten Stähle unzureichend war, ließ sich aber aus den bisherigen Untersuchungen nicht erbringen. Es wurde an eine Änderung des Werkstoffes durch die Rußblasevorrichtung gedacht, auch von Wasserschlag wurde gesprochen. Die Firma Rekuperator K.G. schreibt zu der letzterwähnten Auffassung am 31.7.1943 an Linz: Die meisten der seinerzeit aufgestellten Theorien sind durch die Ludwigshafener Beschädigungen widerlegt worden. Die Vermutung von Schack, daß die Berührung mit dem Isolierstein unter Einwirkung der reduzierenden Atmosphäre den Rohrwerkstoff geschädigt habe, fand keine Stütze. Zur Frage der Auswirkung hoher mechanischer Spannungen schreibt Schack ~~unter anderem~~ am angeführten Ort: "Aus dem Lu-Befund folgt, daß wesentliche Spannungen im System nicht gewesen sind, da sonst die dünnen Rohre stark verbogen wären." Es bleibt fraglich, inwieweit man dieser Meinung beipflichten kann.

Ganz besonders war die Frage der Sprödigkeit des Werkstoffes hervorgehoben worden. Schack glaubte zunächst schließen zu müssen, "daß eine ganz besonders starke Versprödung der Rohre in einem bestimmten Temperaturbereich stattgefunden haben muß". Es ist nun durchaus bekannt, daß bereits bei dem Legierungsgrad des FF6 N-Stahles, der für die nahtlosen Rohre verwendet wurde, die einzelnen Schmelzen sich verschieden verarbeiten lassen und bezüglich ihrer Zähigkeit bei Raumtemperatur unterschreiten können. Eine auffällige Sprödigkeit wurde jedoch bei Raumtemperatur bei dem untersuchten Werkstoff nicht festgestellt. Selbst wenn dies der Fall gewesen wäre, würde aber mit einer besonderen Sprödigkeit bei erhöhter Temperatur nicht zu rechnen sein. Es ist wohl möglich, daß Stähle gewisser Zusammen-

1) Auffassung der Rekuperator K.G. im Schreiben vom 31.7.1943 an Linz:

"Es käme noch in Frage ein Werkstoff-Fehler einiger Rohre, die Haarrisse aufgewiesen haben müßten, die sich langsam zu großen Rissen erweitert haben müßten. Aber diese Lösung ist unwahrscheinlich, da Rohre mit "fehlerhaftem Werkstoff" erfahrungsgemäß das Kaltziehen nicht vertragen und beim Herunterziehen regelmäßig zu Ausschuß wurden."

setzung, z.B. hochlegierte Cr-Stähle sich bei Dauereinwirkung einer Temperatur von 400-500°C so verändern, daß eine ausgesprochene Versprödung eintritt. Aber auch hier handelt es sich weit mehr um ein Sprödverhalten in der Kälte bzw. bei normaler Temperatur als wie in der Wärme. Die untersuchten Sicromal 10-Röhre haben bei normaler Temperatur noch eine durchaus beachtliche Zähigkeit. Die Verhältnisse im Bereich der Schweißung liegen durch die Beeinflussung des Gefüges beim Schweißen nach der ungünstigen Seite hin. Es ist aber auffallend, daß bei der Verbindungsschweißung Furodit 8-Sicromal 10 der Bruch auf der weniger zur Versprödung und Grobkornbildung neigenden Furodit 8-Seite eingetreten ist; man kann geneigt sein, auch daraus zu folgern, daß die Kältsprödigkeit des Stahles in dem vorstehenden Zusammenhang hinter anderen Erscheinungen zurücktritt. Eine ungünstige Veränderung der Werkstoffes durch chemische Einflüsse, wie beispielsweise durch Aufstiekung, wurde bei unseren Untersuchungen nicht beobachtet.

Wenn man alle Gesichtspunkte zusammenfaßt, kommt man zu dem Schluß, daß zwar einige Unsicherheitsmomente vorhanden waren, daß aber der bisherige Befund noch keinerlei befriedigende Erklärung für das Versagen des Vorwärmers ergibt. Es wird sich naturgemäß empfehlen, bei weiteren Apparaten die Unsicherheitsmomente so klein als möglich zu halten. Im Einzelnen wäre hier auf folgendes hinzuweisen:

1) Rundschweißen sollen möglichst vermieden werden. Soweit solche als unumgänglich notwendig angesehen werden, etwa zur Einsparung von hochwertigem Stahl, sollte die Schweißung unter besonderer Kontrolle durch den Materialprüfungsbetrieb Lu erfolgen. Der Frage der Glühbehandlung nach dem Schweißen und der Vermeidung von Versetzungen ist besondere Beachtung zu schenken.

2) Nahtlose Röhre sind längsgeschweißten vorzuziehen. Soweit aus Beschaffungsgründen zu den letzteren gegriffen werden muß, empfiehlt sich eine Abnahmeprüfung durch den Materialprüfungsbetrieb Lu vorzusehen.

Um bei nahtlosen Röhren eine möglichst hochwertige, fehlerfreie Ausführung zu bekommen, empfiehlt es sich, eine Abnahmeprüfung vorzuschreiben. Mit Herrn Prokurist Linden der Firma Mannesmannröhrenwerke wurde bei einer Besprechung am 8.10.1943 vereinbart, daß die für Herstellung und Prüfung im Einzelnen erforderlichen Sondermaßnahmen gemeinsam von Mannesmannröhrenwerke und unserem Materialprüfungsbetrieb Lu festgelegt werden, wenn in der ~~XXXXXX~~ vermutlich durch die Rekuperator K.G. erfolgenden Bestellung vorgeschrieben ist, daß eine ~~XXXX~~ Abnahmeprüfung durch die I.G. erfolgt.

3) Die Einschweißstellen am Rohrboden sollen eine Verbesserung erfahren. Eine Glühbehandlung nach dem Schweißen ist an sich wünschenswert, sollte aber nur angewendet werden, wenn eine sachgemäße Ausführung sichergestellt ist. Gegebenenfalls kann bei Anwendung von Manschetten der Boden mit den eingeschweißten Manschetten für sich spannungsfrei gegläht werden.

- 4) Gegen die Anwendung eines Werkstoffes erhöhter Zunderbeständigkeit sind Bedenken nicht zu erheben, solange nicht zu einem mit besonderer Empfindlichkeit verknüpften Legierungsgrad gegriffen wird. Aus den bisherigen Untersuchungen läßt sich die Notwendigkeit der Verwendung eines Stahles erhöhter Zunderbeständigkeit nicht ableiten.

Das Gesamtbild des bisherigen Befundes führt zu dem Eindruck, daß gewisse Umstände beim Schadhaftwerden der ~~VORWÄRMER~~ Vorwärmer durch Brand mitgewirkt haben könnten, welche bisher noch nicht erfaßt sind. Die oben erwähnten Schritte würden daher wohl eine gewisse Verbesserung durch Einschränkung einiger Unsicherheitsmomente bedeuten, aber noch keine wirklich befriedigende Sicherung gegen plötzliche Überraschungen der bisherigen Art. Ein Merkmal der bisherigen Schadensfälle dürfte sein, daß sie nicht im stabilen Dauerbetrieb aufgetreten sind, sondern in mehr oder weniger engem Zusammenhang mit einem Abstellen der Apparatur. Angeblich sind beim Abstellen die Temperaturen (abgesehen von dem Fall Linz) nicht so tief gesunken, daß etwaige spröde Zonen des Werkstoffes durch Rißerscheinungen in Auswirkung der Wärmespannungen sich auswirken könnten, wenn man weiterhin die Möglichkeit ausschließt, daß bei starken Temperaturschwankungen Undichtheiten auftreten, z.B. derart, daß Zunder absprang

der an etwaigen Fehlstellen längere Zeit gegen Undichtheiten schützte, dann verbleibt noch die Annahme, daß bei dem Erwärmen, nach dem Abstellen sich Vorgänge abspielten, welche zu einer unerwarteten und über die Haltbarkeit des Stahles hinausgehende Temperatursteigerung führten. Unter diesem Gesichtspunkt wäre z.B. die Möglichkeit der einseitigen Wärmezuführung ohne hinreichende Ableitung derselben auf der gegenüberliegenden Rohroberfläche ins Auge zu fassen. Es mag zunächst dahingestellt bleiben, ob ein Belag auf den Rohren, gegebenenfalls im Zusammenhang mit katalytischen Einflüssen einen solchen Vorgang unterstützen konnte. Es ist jedoch bemerkenswert, worauf Herr Linden von der Firma Mannesmannröhren-Werke bei der durch den Materialprüfungsbetrieb veranlaßten Besprechung am 8.10.1943 hinwies, daß auch an anderen Stellen bei stählernen Vorwärmern zum Schmelzen des Stahles führende Brände aufgetreten sind, obwohl die Bedingungen nicht so lagen, daß brennbares Gas vorhanden war, das bei Undichtwerden der Rohre große, zum Schmelzen ausreichende Wärmemengen lieferte. Zu erwähnen sind in diesem Zusammenhang ungünstige Erfahrungen an den Luftvorwärmern der Marine und den als Cowper im Hochofenbetrieb versuchsweise gebauten stählernen Gichtgaswärmeaustauschern; das Beobachtungsmaterial steht uns bisher nicht im Einzelnen zur Verfügung. Es erschien notwendig, der Vollständigkeit wegen auch die Vermutung einer einseitigen Wärmezufuhr ohne hinreichende Abfuhr vorzubringen. Inwieweit sie als berechtigt angesehen werden kann, ist aus der Schaltungs- und Fahrweise vom Betrieb aus zu beurteilen. Wenn man von unbekanntem katalytischen und temperatursteigenden Wirkungen absieht, konnte ja bei einem derartigen, sicher ganz kurzfristigen Vorgang die Temperatur der Rohre nicht über der Höchsttemperatur des wärmeabgebenden Gases liegen. Ein Durchzünden wäre hierbei in Anbetracht der kurzen Zeit kaum möglich; es würde also nur die Frage zu klären sein, ob der Stahl bei diesen Temperaturen so kurzbrüchig ist, daß die vorhandenen Längswärmespannungen einen Anriß bewirken könnten. Nach der bisherigen Kenntnis der Stähle ist eine Anrißbildung auf die beschriebene Art als unwahrscheinlich anzusehen, da der Werkstoff bei Kurzzeitbeanspruchung und hohen Temperaturen sich recht plastisch verhalten dürfte. Immerhin könnten, wenn durch ungleiche Rohrtemperatur lokale Zugspannungen herrschten, an solchen Stellen sich mehr oder weniger starke Einschnürungen gebildet haben, welche bezüglich der späteren Dauerbeanspruchung als Schwachstellen zu gelten hätten.

Der lokale Schadensbereich am Austauscher von Op 631 zeigte nun die letzterwähnten Schwächungen des Rohrquerschnittes durch Einschnürung zufolge von hoher Zuglängsspannung. Es bleibt zu erwägen, ob solche Erscheinungen und in weiterer Folge Anrisse als statische Zeitstandsbrüche nicht auch ohne Übertemperaturen auftreten können. Dies erscheint nun durchaus möglich. Voraussetzung wäre, daß an der Schadensstelle die Temperatur höher als an anderen Stellen liegt, und daß hohe Zugspannungen vorhanden sind, wobei hoch in Bezug auf die Zeitstandfestigkeit zu verstehen ist. Absolut genommen, liegt die Zeitstandfestigkeit, das heißt der zeitabhängige Wert der Bruchfestigkeit der martensitischen und ferritischen Cr-Stähle aber sehr niedrig, z.B.

Die Bedingung der hohen lokalen Temperatur bei gleichzeitiger Zugspannung wäre z.B. erfüllt, wenn das Rohr über einen größeren Teil seiner Länge durch Kühlung verhältnismäßig niedere Temperatur hätte. Wenn die Klärung der Schadensfälle in dieser Richtung liegen sollte, würde auch die Richtung der einzuleitenden Abhilfemaßnahmen gegeben sein.

Herr Dipl.-Ing. Altstaedt teilte in diesem Zusammenhang mit, daß die Rohrbelastung dadurch ungleichmäßig wird, daß zwar der obere Rohrboden eine Verstärkung durch kreuzweise Anordnung von aufgeschweißten Rippen erfuhr, daß jedoch am unteren Rohrboden die Verstärkung nur in Form von parallelen Rippen aufgebracht wurde. Die außenliegenden Rohre in den einander gegenüberliegenden äußersten Feldern, in die der Rohrboden durch die Rippen eingeteilt wird, sind offensichtlich am ehesten gefährdet, bezw. wesentlich anders beansprucht als die äußersten Rohre, die um  $90^\circ$  versetzt dazu liegen.

Der Bericht TA/Mat vom 5.1.1944 Nr. 243419 bringt die Untersuchung eines FF6 N und FF13 Proberohres im Gasstrom bei verschiedenen Temperaturen.

Im Prüfauftrag Nr. 243 423 TA/Mat werden von Rekuperator K.G. eingelieferte Probeschweißungen von Sicromal 12-Rohren, in Rohrböden mit und ohne Manschetten eingeschweißt, untersucht.

# Rekuperator K-G.

DR.-ING. SCHACK & CO.  
DÜSSELDORF

Synthesegasversuche Gp  
Eing. 15. März 1944  
abgelegt:

REKUPERATOR K-G. DR.-ING. SCHACK & CO. DÜSSELDORF

Herrn

Dr. S a c h s s e

I.G. Farbenindustrie A.-G.

(18) Ludwigshafen a./Rh.

Fernsprecher 11912 und 16146

Bankkonto: Deutsche Bank Düsseldorf

Postscheckkonto: Essen-Nr. 10117

Drahtanschrift: Stahlreku. Düsseldorf

HERSTELLERFIRMA:

DEMAG AKT.-GES. DUISBURG

Ihr Zeichen:

Ihr Schreiben v.

Uns. Zeichen: S/Ra.

DÜSSELDORF, 13. März 1944

Mindenburgwall 53/59

Betrifft:

## Vergleich Regeneratoren und Rekuperatoren

Sehr geehrter Herr Dr. Sachsse !

Auf Grund Ihres gestrigen Telefonanrufs habe ich einen Regenerator zur Vorwärmung von  $10\ 000\ \text{Nm}^3/\text{h}$  Gas auf  $700^\circ\text{C}$  berechnet. Unter den wärmetechnisch günstigsten Annahmen betreffend die spezifische Leistung des Regenerators ergeben sich Werte, die ich in der anliegenden Tabelle aufgeschrieben habe.

Die Wärmedurchgangszahl der Periode bezieht sich auf eine halbe Stunde, da eine halbstündige Umstellung vorgesehen ist. Auf eine Stunde umgerechnet würde sie also  $17,2\ \text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  ergeben. Diese Wärmedurchgangszahl ist bei der vorgesehenen Steinstärke von 40 mm schon zu hoch, da sich ein Temperaturabfall des vorgewärmten Gases von  $209^\circ\text{C}$  in der Periode von 1/2 Stunde ergibt. Dieser Temperaturabfall dürfte wohl zu groß sein, sodaß also die Steinstärke erhöht und, da damit der Steinausnutzungsgrad fällt, vor allem die Wärmedurchgangszahl erniedrigt werden muß. Das führt also zu größeren Abmessungen des Regenerators als ich sie hier angegeben habe. Nach der gegenwärtigen Berechnung ist die Grundfläche des Regenerators einschließlich Umfassungsmauerwerk ein Quadrat mit der Kantenlänge von 3,4 m. Die Gesamthöhe beträgt 6,8 m. Ich habe eine Eintrittstemperatur des wärmeabgebenden Gases von  $950^\circ\text{C}$  vorausgesetzt. Ich nehme an, daß eine höhere Temperatur wegen

## REKUPERATOR K. G. DR.-ING. SCHACK &amp; CO. DÜSSELDORF

Fortsetzung zum Brief vom 13.3.44 an Herrn Dr. Sachsse, I. G. Ludwigshafen Seite 2

der zu befürchtenden Kohlenstoffabscheidung bzw. Spaltung der Gase nicht zulässig ist. Die höchste Steintemperatur liegt am Ende der Heizperiode bei ungefähr  $900^{\circ}\text{C}$ . Es fragt sich, ob bei dieser Temperatur nicht schon Schwierigkeiten durch die Zersetzung des vorzuwärmenden Gases am heißen Ende zu erwarten sind.

Die Berechnung ist unter der Bedingung durchgeführt, daß die Heizflächen vollkommen sauber sind, also keinen Rußbelag aufweisen. Ein etwaiger Rußbelag würde natürlich die Leistung des Regenerators in ähnlicher Weise herabsetzen wie die der Rekuperatoren.

Da das Hohlraumvolumen des Regenerators etwa  $15\text{ m}^3$  beträgt, so würde also bei stündlich zweimaligem Umstellen dieses Hohlraumvolumen zweimal verloren gehen, bzw. eine zweimalige Mischung der Gase mit dem wärmeabgebenden Gas eintreten, sodaß also im ganzen  $60\text{ m}^3/\text{h}$  Gas gemischt würden. Zu diesem Hohlraumvolumen kommt allerdings noch das Volumen der Rohrleitungen bis zu den Umsteuerorganen.

Was nun den Preis der Regeneratoren betrifft, so reicht leider die Zeit nicht mehr, Ihnen hierüber irgend welche genaueren Angaben zu machen. Es ist jedoch klar, daß das eigentliche Gitterwerk der Regeneratoren nur einen kleinen Teil der Kosten der Gesamtanlage ausmacht. Selbst bei so großen Anlagen, wie sie moderne Hochofenwinderhitzer für große Hochöfen darstellen, liegt das Verhältnis der Kosten so, daß ein Hochofenwinderhitzer mit Zubehör etwa RM 350 000,-- kostet, während die 600 t zugehöriges Gitterwerk nur RM 60 000,-- kosten.

Sie sehen also, daß selbst bei so großen Regeneratoren die eigentliche Heizfläche nur  $1/6$  der Gesamtanlage kostet.

Wenn der oben errechnete hohe Temperaturabfall von über  $200^{\circ}\text{C}$  in  $1/2$  Stunde auf die Hälfte herabgesetzt werden soll, so kann das in erster Linie <sup>da</sup> durch geschehen, daß die Wärmedurchgangszahl auf die Hälfte herabgesetzt wird. Das bedeutet dann eine Verdopplung der Heizfläche des Regenerators und zwar <sup>annähernd</sup> ~~genau~~ gesagt eine Verdopplung des Gesamtquerschnitts.

Eine wesentliche Steigerung der Steinstärke führt bei der kurzen vorgesehenen Umstelldauer nicht mehr zum Ziele, da dann der Steinausnutzungsgrad anfängt abzufallen.

460000299

REKUPERATOR K. G. DR.-ING. SCHACK & CO. DÜSSELDORF

Fortsetzung zum Brief vom 13.3.44 an Herrn Dr. Sachsse, I.G. Ludwigsh. Seite 3

Bilder von ausgeführten Regeneratorenanlagen habe ich leider nicht zur Verfügung und kann Ihnen auch keine so schnell anfertigen lassen, da der Brief ja heute herausgehen muß. Ich hoffe aber, daß ich Ihnen hiermit einige Anhaltspunkte für Ihren Vortrag geben konnte.

Mit den besten Grüßen

Ihr



Anlage: 1 Tabelle

# REKUPERATOR K. G. DR. ING. SCHACK & CO. DÜSSELDORF

Fortsetzung zum Brief vom 13.3.44 an Herrn Dr. Sachsse, Ludwigshafen. Seite

## Regenerator für 10 000 Nm<sup>3</sup>/h Gas

Vorzuwärmende Gasmenge .....	10 000 Nm <sup>3</sup> /h
Wärmeabgebende " .....	13 100 "
Eintrittstemperatur des wärmeabgebenden Gases .....	950 °C
Austrittstemperatur " " " " .....	300 "
Eintrittstemperatur " vorzuwärmenden " .....	70 "
Austrittstemperatur " " " " .....	700 "
Geschwindigkeit " " " w <sub>0</sub> ' =	2,3 m/s
" " " wärmeabgebenden " w <sub>0</sub> =	3,0 "
Stärke der Gittersteine .....	s = 40 mm
Durchmesser der Kanäle .....	d = 30 mm
Gesamtquerschnitt des Gitterwerks 26 · 26 .....	= 6,75 m <sup>2</sup>
Höhe des Gitterwerks .....	4,1 m
Wärmeübergangszahl des wärmeabgebenden Gases α =	56 kcal/m <sup>2</sup> h
" " wärmeaufnehmenden " α' =	42 kcal/m <sup>2</sup> h °C
Wärmedurchgangszahl der Periode .....	κκ = 8,6 kcal/m <sup>2</sup> Per °C
Dauer der Halbperiode .....	t <sub>H</sub> = 0,5 h
Dauer der Periode .....	t <sub>p</sub> = 1,0 h
Heizfläche eines Regenerators .....	619 m <sup>2</sup>
Temperaturabfall des vorgewärmten Gases .....	209 °C/Per
Hohlraumvolumen eines Regenerators .....	~ 15 m <sup>3</sup>
Gewicht des Gitters eines Regenerators .....	44 t
Außere Oberfläche " " .....	104 m <sup>2</sup>
Gesamtquerschnitt " " = 3,4 · 3,4 =	11,5 m <sup>2</sup>
Gesamthöhe ohne Brenner .....	6,8 m
Wärmeverlust durch Strahlung und Leitung von 2 Regeneratoren .....	~ 130 000 kcal/h = 5 % der Nutzwärme.