

**Entstehung und Vermeidung von Rissen
in Membranrohrwänden
von Abhitzeesseln**

Von der Fakultät Maschinenbau der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Magnus Langenstein
aus Lörrach

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. E. Roos

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. K. Hein

Tag der mündlichen Prüfung: 20.10.2003

Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart

2003

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit bei der Firma BTB-Jansky GmbH in Leonberg. Die experimentellen Untersuchungen konnten im Rahmen von Einzelprojekten mit freundlicher Unterstützung zweier Stahlwerke durchgeführt werden.

Dem Direktor der MPA, Herr Professor Dr.-Ing. Roos, der die Arbeit wissenschaftlich betreute, gilt mein besonderer Dank für die wertvollen Anregungen und Aussprachen.

Insbesondere Herrn Dr.-Ing. Josef Jansky bin ich zu großem Dank verpflichtet. Durch seine tatkräftige Unterstützung, den vielen Anregungen und den wertvollen Diskussionen konnte diese Arbeit erst entstehen.

Bei meinen Kollegen von BTB-Jansky GmbH möchte ich mich für die Unterstützung bei den Messungen und den wichtigen Diskussionen bedanken. Hierbei gilt mein spezieller Dank Herrn Hussein, der mir bei allen Messungen eine große Hilfe war. Meiner Frau möchte ich für ihre Geduld und ihre Unterstützung danken.

Leonberg, Oktober 2003

Magnus Langenstein

INHALTSVERZEICHNIS	Seite
1 Abkürzungen und Formelzeichen	5
2 Zusammenfassung / Abstract	8
3 Einleitung und Zielsetzung	14
4 LD-Verfahren, verfahrenstechnischen Funktionsweise und Konstruktion von Abhitzekeßeln	16
4.1 LD-Verfahren	16
4.2 Verfahrenstechnische Funktionsweise der Abhitzekeßel	17
4.3 Konstruktion der Abhitzekeßel	20
5 Bisherige Schadensbilder	23
5.1 Auswertung verfügbarer Dokumentation	23
5.2 Querrisse	27
5.3 Verschleiß der Membranwände	43
6 Physikalische Hintergründe der Schäden / Schädigungsmechanismus	46
6.1 Literaturrecherche	46
6.2 Schädigungsmechanismus	57
7 Bestimmung der lokalen Temperaturbedingungen mit Ni/CrNi-Thermoelementen	59
7.1 Prinzipielle Vorgehensweise	60
7.2 Temperaturmessung Nr. 1	65
7.3 Temperaturmessung Nr. 2	66
7.4 Temperaturmessung Nr. 3	67
7.5 Temperaturmessung Nr. 4	67
7.6 Temperaturmessung Nr. 5	68
7.7 Diskussion der Messergebnisse	69

INHALTSVERZEICHNIS	Seite
8 Bestimmung der lokalen Temperaturbedingungen mittels Thermographiemessung	71
8.1 Theoretische Grundlagen	71
8.2 Ergebnisse bei Thermographiemessungen im Stahlwerk A	75
8.3 Ergebnisse bei Thermographiemessungen im Stahlwerk B	83
9 Parameterstudien mittels Finite-Elemente Berechnungen	86
10 Analyse der gemessenen Temperaturen	98
11 Aufbau eines deterministischen Lebensdauerbewertungsmodells	102
12 Abgeleitete Maßnahmen zur Vermeidung von Querrissen	113
12.1 Konstruktive Maßnahmen	113
12.2 Verfahrenstechnische Maßnahmen	113
13 Schlussfolgerungen und Ausblick	122
14 Literaturverzeichnis	124
15 Anhang	129

1 Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

FE	Finite-Elemente
HVOF	High velocity oxy fuel flamespraying
HWT	Heißwasserteil
IR	Infrarot
LEFM	linear elastic fracture mechanics
LI	Linie
LD	Linz Donawitz; zwei Städte in Österreich, nach denen das LD-Verfahren benannt wurde
MFM	microstructural fracture mechanics
ND	Niederdruck
Ni/CrNi	Nickel/Chrom-Nickel-Werkstoff der Thermoelementdrähte
VALI III	V alidierungssoftware für verfahrenstechnische Prozesse
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung

Formelzeichen

a	Risstiefe in [mm]
ab	Absorptionsgrad
a_{ist}	Istwanddicke in [mm]
a_{crit}	kritische Wanddicke in [mm]
a_{soll}	Sollwanddicke in [mm]
C_{anriss}	Zyklenanzahl bis Anriss
c_p	spezifische Wärmekapazität
d_a	Äußerer Durchmesser in [mm]
d_i	innerer Durchmesser in [mm]
d_m	mittlerer Durchmesser in [mm]
da/dN	Risswachstumsrate in [mm/Lastwechsel]
E	Elastizitätsmodul in [MPa]
F_g	gesamte Wärmeübertragungsfläche in [m ²]

Formelzeichen

f_q	Wärmestromverteilungsfaktor
ν_W	kinematische Viskosität für Wasser in [m ² /s]
K_{IC}	Spannungsintensitätsfaktor in [MPa \sqrt{m}]
$M_{\text{reale Oberfläche}}$	spezifische Ausstrahlung einer realen Oberfläche in [W/m ²]
$M_{\text{Schwarzer Strahler}}$	spezifische Ausstrahlung des schwarzen Strahlers in [W/m ²]
\dot{m}	Massenstrom in [kg/s]
N_A	Anrisslastspielzahl
Nu	Nußeltzahl
p	Druck in [bar]
Pr	Prandlzahl
\dot{q}	mittlere Wärmestromdichte in [W/m ²]
\dot{Q}_{ab}	abgeführte Wärme in [W]
\dot{Q}_{zu}	zugeführte Wärme in [W]
Q_β	Wärmestromdichte abhängig von Einstrahlungsrichtung in [W/m ²]
Q_N	Wärmestromdichte in Flächennormalenrichtung in [W/m ²]
re	Reflexionsgrad
r_i	Innendurchmesser in [mm]
R	Spannungsverhältnis
Re	Reynoldszahl
R_{eh}	Streckgrenze in [MPa]
R_m	Zugfestigkeit in [MPa]
s	Standardabweichung
S_a	Vergleichsspannungsschwingbreite in [MPa]
t	Stegbreite in [mm]
tr	Transmissionsgrad
T_s	Sättigungstemperatur in [° C] des Mediums bei 15bar
T_W	Kühlwassertemperatur in [° C]
T_D	Dampf Temperatur in [° C]
u	Verhältnis r_a/r_i
V	Verschleißrate in [mm]
X	Dampfgehalt

Formelzeichen

α	Temperaturausdehnungskoeffizient $13 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$
α_w	Wärmeübergangszahl in $[\text{W/m}^2\text{K}]$
ΔK_I	Spannungsintensitätsschwingbreite in $[\text{MPa}\sqrt{\text{m}}]$
ΔT	Temperaturdifferenz in $[\text{K}]$
ε	Emissionsfaktor
$\varepsilon_{\text{ages}}$	behinderte Dehnung in $[\%]$
β	Winkel zwischen eingestrahltm Wärmestrom und Flächennormale
ϕ	Spannungskorrekturfaktor
σ	Spannung in $[\text{MPa}]$
σ_{ST}	Stefan Boltzmann Konstante $5,669 \cdot 10^{-12} [\text{Wcm}^2\text{K}^4]$
ν_D	kinematische Viskosität für Dampf in $[\text{m}^2/\text{s}]$
ν_w	kinematische Viskosität für Wasser in $[\text{m}^2/\text{s}]$
ρ_D	Dichte von Dampf in $[\text{kg}/\text{m}^3]$
ρ_w	Dichte von Wasser in $[\text{kg}/\text{m}^3]$
λ_D	Wärmeleitfähigkeit von Dampf in $[\text{W}/\text{mK}]$
λ_w	Wärmeleitfähigkeit von Wasser in $[\text{W}/\text{mK}]$
ζ	Widerstandsbeiwert

2 Zusammenfassung / Abstract

Abhitzekessel werden in Stahlwerken zur Kühlung der heißen, mit Staub beladenen Rauchgase verwendet. Die Rauchgase entstehen während des Stahlerzeugungsprozesses mit dem Linz-Donawitz (LD)-Verfahren durch Sauerstoffaufblasen auf die Stahlschmelze. Während der Dauer des Sauerstoffaufblasens von etwa 20 Minuten werden die Membranrohrwände der Abhitzekessel durch die heißen Rauchgase stark erhitzt. Nach Beendigung des Blasvorganges wird die Schmelze, die sich im sogenannten Konverter befindet, abgelassen. Anschließend erfolgt die Neubeladung des Converters mit Roheisen und Schrott. In dieser Phase kühlt der Abhitzekessel aus. Somit unterliegen die Abhitzekesselheizflächen ständigen thermischen Lastwechseln.

An den Kesselunterteilen der Abhitzekessel, die um 20 ° bis 30 ° gegenüber der Vertikalen geneigt sind, treten dabei unterschiedliche Schadensbilder und Schadenshäufigkeiten auf. Während im vorderen und hinteren Bereich der Abhitzekessel der erosive Verschleiß auf Grund der im Rauchgas mitgeführten Staubpartikel groß ist, treten ausschließlich im hinteren Bereich auch querorientierte Risse auf.

Zum Aufbau eines deterministischen Lebensdauerbewertungsmodells für diese Bereiche, unter Berücksichtigung des hohen Verschleißes und der Querrissbildungen, wurden in zwei deutschen Stahlwerken zahlreiche Temperaturmessungen mit Thermoelementen und einer Infrarotkamera durchgeführt.

Die Messungen wurden im **Stahlwerk A** sowohl an glatten als auch an innenberippten Rohren mit rauchgasseitiger Beschichtung, auf der rauchgaszugewandten und der rauchgasabgewandten Seite durchgeführt. Dabei wurden Temperaturen auf dem rauchgaszugewandten Rohrscheitel von maximal 450 ° C und auf dem rauchgasabgewandten Rohrscheitel von bis zu 190 ° C gemessen. Die Analyse der Messergebnisse mittels Finit-Elemente Analysen ergab, dass sich die gemessenen Temperaturen nur bei Vorliegen einer Schichtenströmung innerhalb der Kühlrohre einstellen können.

Die Temperaturmessungen im **Stahlwerk B** erfolgten auf der rauchgasabgewandten Seite ausschließlich an glatten Rohren ohne Beschichtung. Hierbei wurden maximale Rohrscheiteltemperaturen von 245 ° C gemessen.

Auf Basis der Messergebnisse wurden Parameterstudien mittels Finiter Elemente (FE) Analysen durchgeführt. Mit den Ergebnissen aus den Parameterstudien ist es möglich, von den auf der rauchgasabgewandten Seite gemessenen Temperaturen auf die rauchgasseitigen Temperaturen zu schließen. Somit ist die Ermittlung der behinderten Wärmedehnung im Rohrquerschnitt und die Berechnung der Lebensdauer der Rohre möglich. Die Anwendung des abgeleiteten deterministischen Lebensdauerbewertungsmodells auf die zwei unterschiedlichen Kesselunterteilausführungen ergibt,

- dass die Lebensdauer beschichteter Rohre durch ein Versagen auf Grund von Querrissen begrenzt wird.
- dass die festgestellten Risse und Risslängen der beschichteten Rohre mit theoretisch abgeleiteten Anrisslastwechselzahlen zur Bildung erster Anrisse nicht korreliert werden können. Nur unter der Annahme, dass Anrisse in der Beschichtung schon vor der ersten Inbetriebnahme vorliegen, können die metallographisch festgestellten Risstiefen mit dem Lebensdauermodell theoretisch ermittelt werden.
- dass die Lebensdauer unbeschichteter Rohre durch den Verschleiß begrenzt wird.

Zur Bestimmung der verfahrenstechnischen Einflussgrößen, die auf eine mögliche Dampfbildung und somit auf die Schichtenströmung innerhalb der Kühlrohre besonders großen Einfluss haben, wurden mit Hilfe eines thermodynamischen Berechnungsverfahrens, der sogenannten Prozessdatenvalidierung, zwei Parameterstudien durchgeführt.

Für die Stahlwerke A Heißwasserteile konnte dabei der Kühlwassermassenstrom identifiziert werden. Hier sollte bei der Auslegung von Heißwasserteilen darauf geachtet werden, dass zur individuellen Einstellung des Kühlwassermassenstroms für das vordere und das hintere Kesselunterteil getrennte Speisewassereintrittssammler vorgesehen werden.

Für die Stahlwerke B Kesselunterteile, die zur Dampferzeugung verwendet werden, konnten als verfahrenstechnisch wichtigste Einflussgrößen die Speisewassereintritts-

temperatur und der Speisewasserdruck identifiziert werden. Die Speisewassertemperatur und der Speisewasserdruck ist so festzulegen, dass der Sättigungszustand, abhängig von der jeweils herrschenden Wärmestromdichte, unter keinen Umständen erreicht wird.

Weitere, experimentell noch zu untersuchende konstruktive Lösungsansätze zur Vermeidung oder Verringerung der auftretenden Schäden sind:

- Anbringen der Stege nicht wie bisher in der neutralen Phase, sondern anschweißen der Stege an die rauchgasabgewandten Rohrscheitel. Damit erhöht sich zum einen die Wärmeübertragungsfläche und zum anderen dürften die Temperaturdifferenzen zwischen rauchgaszugewandtem und rauchgasabgewandten Rohrscheitel geringer werden.
- Anbringung einer Isolierung auf der rauchgasabgewandten Seite. Damit besteht ebenfalls die Möglichkeit, die Temperaturdifferenzen zwischen rauchgaszugewandtem und rauchgasabgewandten Rohrscheitel zu verringern.
- Entwicklung einer Beschichtung, die den herrschenden Bedingungen standhält.

Abstract

Heat recovery boilers are used in steelworks to cool the hot flue gases which are laden with dust. These flue gases originate during the Linz-Donawitz (LD) steel production process when oxygen is top-blown onto the molten steel. The membrane tube walls of the heat recovery boilers are heated rapidly by the hot flue gases for the duration of the oxygen process (approximately 20 minutes). At the end of the top-blowing phase, the molten mass inside what is referred to as the converter is drained off. The converter is then reloaded with pig iron and scrap. During this phase the heat recovery boilers cool down. The boiler heating surfaces are thus subjected to continuous thermal load reversals.

Different types and intensities of damage are encountered on the bottom sections of the heat recovery boilers, which are inclined at an angle of 20° to 30° from the vertical. Whereas in both the front and back areas of the boilers there is considerable erosive wear on account of the dust particles which are entrained in the flue gas, transverse cracks occur in the back part only.

Numerous temperature measurements with thermocouples and an infrared camera were carried out in two German steelworks, with a view to designing a deterministic life expectancy model for these areas that takes account of the severe wear and the transverse cracking.

The measurements in **steelworks A** were performed on both smooth and internally ribbed tubes with a coating on the flue gas side, on the side facing the flue gas and on the side facing away from it. Temperatures of up to 450 °C on the tube crown facing the flue gas and 190 °C on the tube crown facing away from it were measured. Finite element analyses of the results revealed that the measured temperatures can only occur if a laminar flow is present inside the cooling tubes.

The temperature measurements in **steelworks B** were only performed on smooth tubes without coating, on the side facing away from the flue gas. In this case, the maximum temperature measured at the tube crown was 245 °C.

Parameter studies were carried out on the basis of the measurement results with the help of finite element (FE) analyses. The results of these studies enable the temperatures on the flue gas side to be inferred from the temperatures which were measured on the side facing away from the flue gas. It is hence possible to calculate both the hindered thermal expansion in the tube cross-section and the life expectancy of the tubes. When applied to the two different boiler bottom section designs, the deterministic life expectancy model derived from these results allows us to draw the following conclusions:

- The life expectancy of coated tubes is limited by failures attributable to transverse cracks.
- The cracks and crack lengths which were established in the coated tubes cannot be correlated with theoretically derived stress cycle numbers relating to incipient fatigue cracking. The metallographically measured crack depths can only be determined theoretically with the life expectancy model if it is assumed that incipient cracks already existed in the coating prior to commissioning.
- The life expectancy of uncoated tubes is limited by wear.

Two parameter studies were carried out using a thermodynamic calculation method known as process data validation, in order to determine those process variables with the greatest influence on the possible formation of steam and hence on the laminar flow inside the cooling tubes.

The cooling water mass flow was identified for the hot water parts in steelworks A. It is important to ensure that separate feed water inlet headers are provided when hot water parts are designed, to permit the cooling water mass flow to be adjusted individually for the front and back bottom sections of the boiler.

The feed water inlet temperature and the feed water pressure were identified as the most important influencing process variables in the bottom boiler sections of steelworks B, which are used to generate steam. Depending on the prevailing heat flow density, the feed water temperature and the feed water pressure must be designed such that a state of saturation is not reached under any circumstances.

The following alternative design strategies for avoiding or containing the damage which occurs have yet to be investigated with the aid of experiments:

- Welding the ribs onto the tube crowns facing away from the flue gas side, rather than incorporating them in the neutral phase as is the case at present. This would firstly increase the size of the heat transfer surface and secondly, in all probability, cause the temperature differences between the side of the tube crown facing towards the flue gas and the side facing away from it to be reduced.
- Fitting an insulation layer onto the side facing away from the flue gas. This would likewise allow the temperature differences between the side of the tube crown facing the flue gas and the side facing away from it to be reduced.
- Developing a coating which is capable of withstanding the prevailing conditions.

3 Einleitung und Zielsetzung

Abhitzeessel werden in Stahlwerken zur Kühlung der heißen und mit Staub beladenen Rauchgase verwendet. Die Rauchgase entstehen während des Stahlerzeugungsprozesses mit dem Linz-Donawitz (LD)-Verfahren durch Sauerstoffaufblasen auf die Stahlschmelze. Die Kühlung der heißen Rauchgase erfolgt durch die mit Speisewasser durchströmten Membranwände (Rohr-Steg-Rohr gasdichte Schweißverbindung, Werkstoff 15 Mo 3) des Abhitzeessels.

Fehlerlose Membranwände sind die Voraussetzung für die Aufrechterhaltung des Stahlherstellungsprozesses, da ein Eindringen von großen Speisewassermengen in die im Konverter befindliche Stahlschmelze zu Wasserstoffexplosionen führen können. Die mit hoher Geschwindigkeit entlang der Membranwände strömenden staubbeladenen Rauchgase verursachen an den brennkammerseitigen Kühlrohroberflächen der Membranwände einen hohen Verschleiß. Die kontinuierliche Abnahme der Rohrwanddicken führt mit der Zeit zu Rohrlängsbrüchen unter Betriebsbedingungen.

Auf Grund der zyklisch auftretenden Belastung während des Stahlherstellungsprozesses werden die Membranwände zusätzlichen wechselnden thermischen Beanspruchungen ausgesetzt, die zu Querrissbildungen (Rohrumfangsrichtung) führen können. Bedingt durch die Neigung des Abhitzeesselunterteils treten die Querrisse ausschließlich in den hinteren Rohrbrettern auf.

Es soll untersucht werden, welche Ursachen für die Bildung der Querrisse verantwortlich sind und welche Abhilfemaßnahmen ergriffen werden müssen, um eine geringere Schadenshäufigkeit mit abnehmenden Verschleißraten oder sogar Fehlerfreiheit zu erzielen. Da angenommen werden kann, dass bei einer besseren Kühlung der einzelnen Rohrbretter die zur Bildung von Querrissen erforderlichen Temperaturdifferenzen als auch die hohen Verschleißraten unterbunden, oder erst zu einem späteren Zeitpunkt auftreten,

soll der Einfluss

- eines veränderten Rohrquerschnittes (innenberippte Rohre im Vergleich zu glatten Rohren)
- der verfahrenstechnischen Randbedingungen (z.B. Kühlwasserdruck, Kühlwassertemperatur, Kühlwassermenge) und
- einer brennkammerseitige Sinterbeschichtung der Rohrbretter

auf die Schadenshäufigkeit untersucht werden. Die Untersuchungen zur Klärung der Schäden wurden in zwei deutschen Stahlwerken an konstruktiv und verfahrenstechnisch unterschiedlichen Abhitzekeesseln durchgeführt. Zur Ursachenermittlung wurden zuerst die Kühlverhältnisse in einzelnen Rohrbrettern mit Hilfe von Temperaturmessungen während des Betriebes erfasst. Zur Klärung eines eventuellen Einflusses der Blenden in den einzelnen Rohren der Membranwände, wurde über die gesamte Rohrbrettbreite der Temperaturverlauf mittels Infrarotkamera erfasst.

Da sich die Kühlung der Rohre drastisch verschlechtert, wenn das Kühlmittel eine Dampfphase ausbildet, wurden für die beiden Kühlkreisläufe der Abhitzekeessel Parameterstudien mit einem thermodynamischen Berechnungsprogramm durchgeführt. Damit soll geklärt werden, wann und unter welchen verfahrenstechnischen Bedingungen sich eine Dampfphase ausbilden kann.

Die Auswirkungen der thermischen Randbedingungen sollen bis zur Lebensdauerabschätzung der Membranwände betrachtet und mit metallographischen, fraktographischen sowie bruchmechanischen Untersuchungen belegt werden. In einem phänomenologisch aufgebauten theoretischem Berechnungsmodell sollen dann die gemessenen Daten auf Plausibilität geprüft werden.

4 LD-Verfahren, verfahrenstechnischen Funktionsweise und Konstruktion von Abhitzekeesseln

Die der Arbeit zugrunde liegenden Untersuchungen wurden in zwei Stahlwerken durchgeführt, da hier die gleichen Schadensbilder (Querrisse, vor allem in der Rückwand) auftraten. In beide Anlagen wird mit dem LD-Verfahren Stahl erschmolzen. Die verfahrenstechnische Funktionsweise, die Betriebsbedingungen und die Konstruktion der Abhitzekeessel in den beiden LD-Anlagen ist jedoch prinzipiell unterschiedlich.

4.1 LD-Verfahren

Beim **Linz Donawitz-Verfahren** oder auch Sauerstoffaufblasverfahren wird flüssiges Roheisen und Eisenschrott in einen ausgemauerten Konverter (Fassungsvermögen ca. 300 t) gefüllt. Eine wassergekühlte Sauerstofflanze wird in den Konverter eingefahren und bläst reinen Sauerstoff mit einem Druck von etwa 10 bar auf die Schmelze auf. Der Blasvorgang dauert ca. 20 bis 30 Minuten wobei der Sauerstoff die Begleitelemente in der Schmelze unter Wärmeabgabe oxidiert.

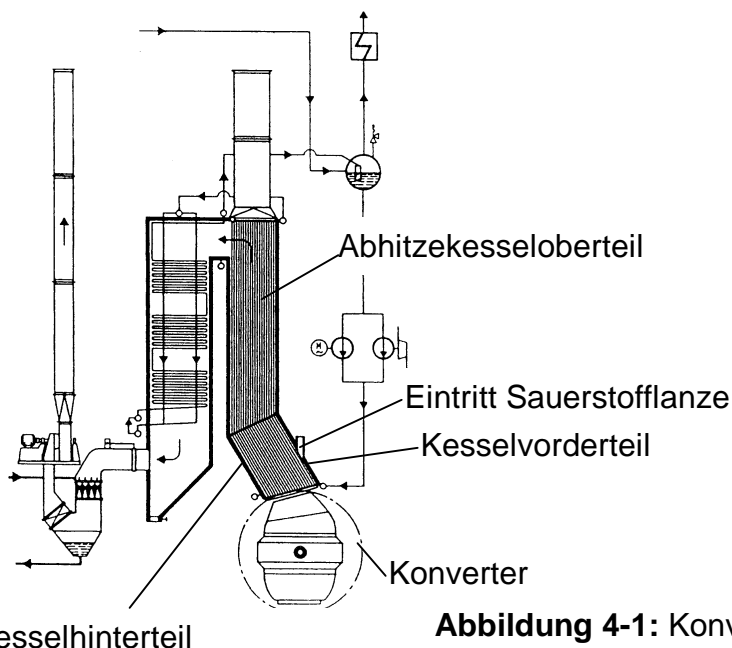


Abbildung 4-1: Konverter mit Abhitzekeessel /1/

Die sich dabei entwickelnden staubbeladenen heißen Rauchgase, die gasförmige Oxide wie Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Schwefeldioxid enthalten, werden über den Abhitzekeessel geleitet und abgekühlt. In **Abbildung 4-1** ist ein Konverter mit

Abhitzekessel dargestellt. Der Kesselunterteil ist wegen der Lanzeneinführung gegenüber der Vertikalen geneigt. Das Kesselmittekteil und Kesseloberteil weisen eine vertikale Kühlrohranordnung auf.

4.2 Verfahrenstechnische Funktionsweise der Abhitzekessel

Abhitzekessel Stahlwerk A

In **Abbildung 4-2** ist ein Systemschema der gleich ausgeführten Abhitzekessel 1 und 2 zu erkennen. Danach bestehen beide Abhitzekessel jeweils aus einem Heißwasserteil (HWT) einem Naturumlaufteil und einem Zwangsumlaufteil.

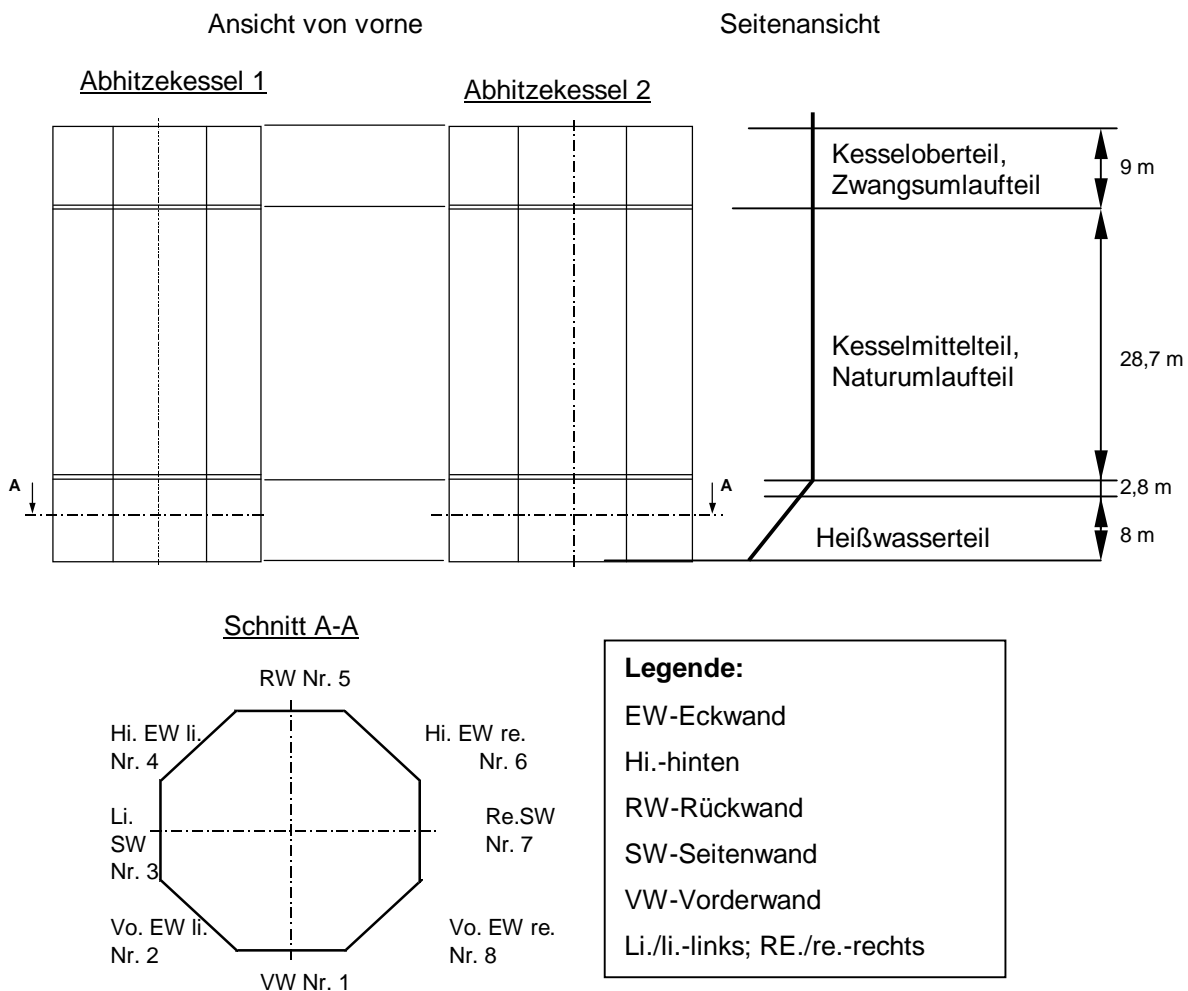


Abbildung 4-2: Aufstellplan

Das **Heißwasserteil (HWT)** dient ausschließlich zum Kühlen der heißen Rauchgase. In einem geschlossenen Kreislauf wird das Kühlwasser nach der Erwärmung im HWT über einen Luftkühler, der über mehrere Ventilatoren mit Kühlluft versorgt wird, abgekühlt und wieder dem HWT zugeführt.

In den HWT-Kühlkreisläufen ist jeweils ein Ausgleichsbehälter (Stickstoffpolster über dem Wasserspiegel; Innendruck 15 bar) installiert, der als Druckhalter des Systems funktioniert. Während des Blasvorganges kommt es zu einer Erwärmung des Kühlwassers, womit sich das Volumen und somit auch der Systemdruck vergrößert, was über das elastisch wirkende Stickstoffpolster kompensiert wird.

Steigt das Volumen und somit der Druck des Systems an, weicht das Kühlwasser in die Ausgleichsbehälter aus. Fällt der Druck unter 15 bar ab oder befindet sich eine Leckage im Kühlkreislauf wird Wasser aus den Ausgleichsbehältern in das System zurückgedrückt. Während eines Blasvorganges kommt es zu Druckschwankungen in den Ausgleichsbehältern bis zu 2 bar.

Zur Umwälzung der Kühlwassermenge sind bei Abhitzeessel 1 zwei und bei Abhitzeessel 2 drei Umwälzpumpen vorhanden. Der Normalbetrieb wird mit einer Pumpe bei Abhitzeessel 1 und mit zwei Pumpen bei Abhitzeessel 2 gefahren.

Der **Naturumlaufteil** des Kessels wird zur Dampfproduktion verwendet. Der **Zwangsumlaufteil** wird ausschließlich zur Kühlung der Rauchgase im Bereich des Kaminaustrittes benötigt.

Abhitzekessel Stahlwerk B

In **Abbildung 4-3** ist eine schematische Darstellung der gleich ausgeführten Abhitzekessel 1 und 2 zu erkennen.

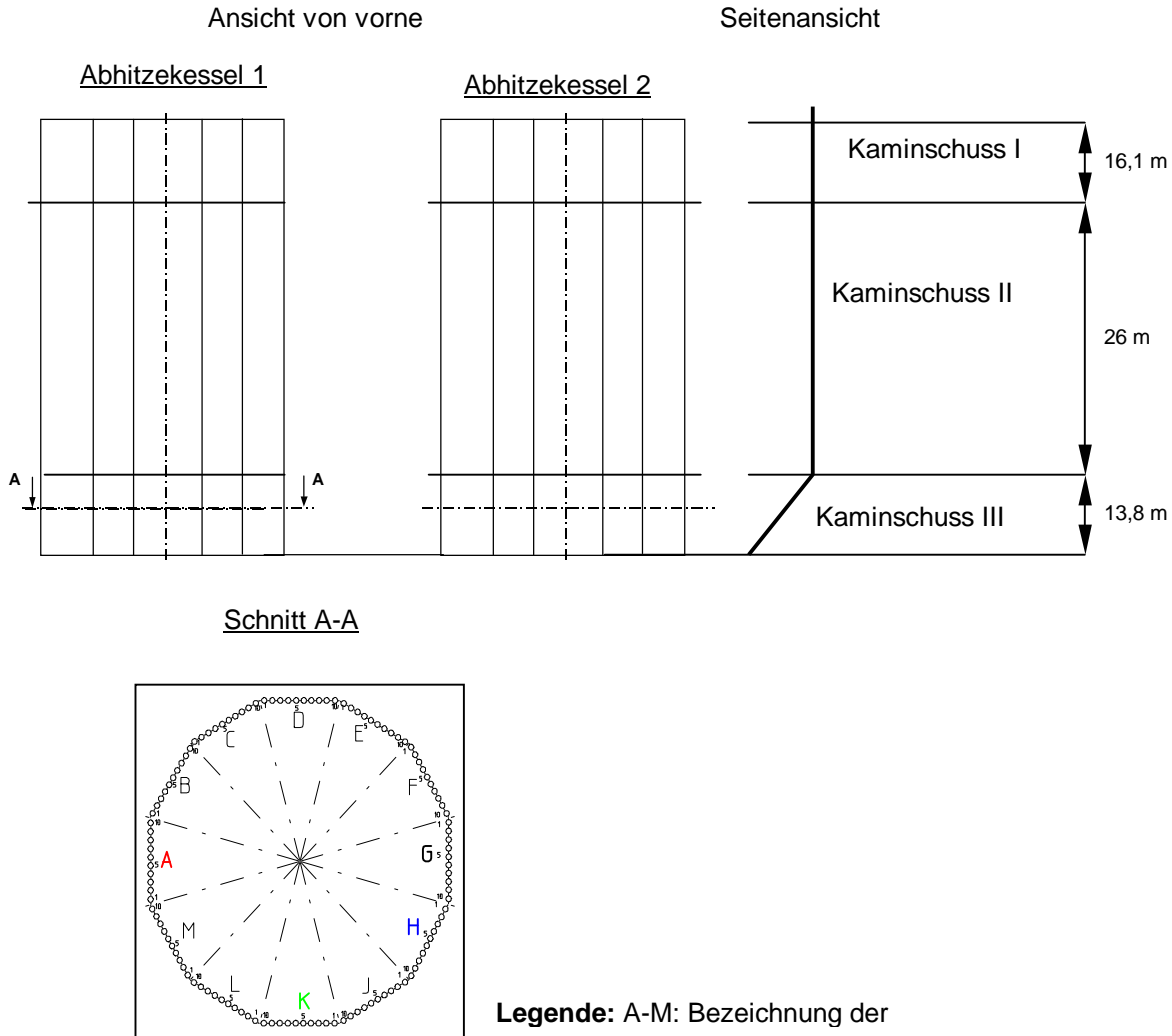


Abbildung 4-3: Schematische Darstellung

Die ursprünglich als Naturumlaufkessel ausgelegten Abhitzekessel wurden nachträglich durch den Einbau von Umwälzpumpen zu Zwangsumlaufkesseln umgebaut. Die Umwälzpumpen, eingebaut in die unbeheizten Fallrohre des Kessels, erzeugen eine zusätzliche Druckdifferenz, wodurch der Kesselkreislauf gegenüber dem Naturumlaufkessel (Betriebsdruck 16-33 bar, Umlaufkraft, die sich aus spezifischen Gewichtsunterschieden zwischen kaltem Zulauf in den Fallrohren und Heißwasser, bzw. Wasser-/Dampfmischung in den Steigrohren ergibt) zusätzlich unterstützt wird.

Die mit Stegen verbundenen Steigrohre sind als gasdicht verschweißte Membranwände des Kühlkamins konzipiert. Die rauchgasseitige Oberfläche der Steigrohre stellt die Wärmetauscherfläche des Kamins dar. Parallel zu den Membranwänden strömen die beim Blasvorgang im Konverter frei werdenden heißen Rauchgase. Die Rauchgas-mengen werden über eine Drosselklappe und ein Saugzuggebläse geregelt.

Beim Durchströmen des Kühlkamins werden die Rauchgase an den Membranwandoberflächen gekühlt. Die abgegebene Wärmeenergie wird von dem Kesselwasser in den Steigrohren aufgenommen, wodurch sich das Kesselwasser erwärmt und eine Teilmenge verdampft. Das in den Steigrohren entstehende Wasser-/Dampfgemisch wird durch die Überströmrohre in die Obertrommel weitergeleitet. Hier wird der Dampf entnommen und durch die Verbindungsleitungen zu den Dampfspeichern geleitet. Die entnommene Dampfmenge wird durch einen entsprechenden Speisewasserzulauf in die Obertrommel ersetzt. Das durch die Speisewasserzuleitung in der Obertrommel abgekühlte Kesselwasser wird wieder über die Fallleitung und die Umwälzpumpe zum Stegrohrwandeintrittsammler gepumpt.

4.3 Konstruktion der Abhitzeessel

Stahlwerk A

Eine Darstellung des HWT-Querschnittes und die Bezeichnung der Rohrwände ist **Abbildung 4-4** zu entnehmen. Das **Heißwasserteil (HWT)** ist um 30° gegenüber der Vertikalen geneigt; siehe **Abbildung 4-2**. Er besteht aus insgesamt acht Sektionen. Beim Einsatz von glatten Rohren besteht jede der Sektion aus insgesamt 38 Einzelrohren (Außendurchmesser: 31,8 mm, Wanddicke: 5 mm) die mit Stegen gasdicht verschweißt sind. Die Teilung (ein Rohr plus ein Steg) beträgt 42,6 mm. Der Durchflussquerschnitt je Rohr beträgt somit 373,25 mm².

Beim Einsatz von innenberippten Rohren besteht jede der Sektion aus insgesamt 36 Einzelrohren (Außendurchmesser: 33,7 mm, Wanddicke: 4,57 mm, Anzahl der Innenrippen: 6, Rippenhöhe: 1 mm, Rippenbreite 5,59 mm) die mit Stegen gasdicht

verschweißt sind. Die Teilung (ein Rohr plus ein Steg) beträgt 45 mm. Der Durchflussquerschnitt je Rohr beträgt somit 440,14 mm².

Als Werkstoff für Rohre und Stege wurde 15 Mo 3 verwendet, wobei die dem Feuer- raum zugewandte Wandseite in den beiden hinteren Eckwänden (Nr. 4 und 6) sowie in der Rückwand (Nr. 5) mit einer Nickel-Basis-legierten Sinterbeschichtung versehen ist. Die Beschichtung wird mit einem von der Firma Babcock entwickelten Flamm-spritzver- fahren aufgebracht.

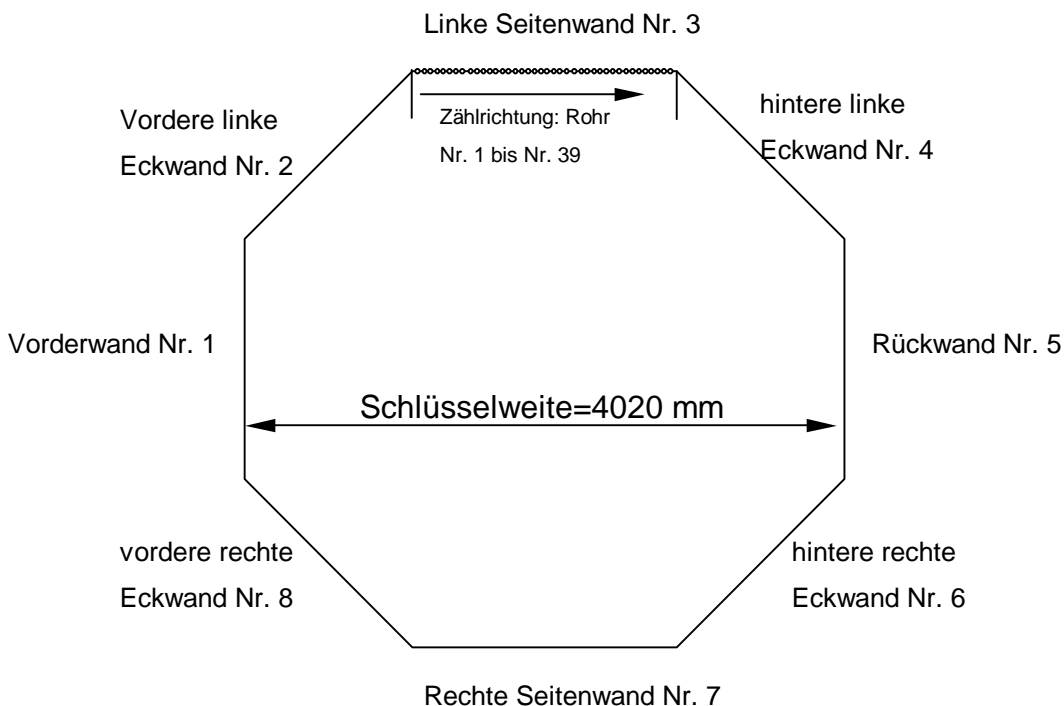


Abbildung 4-4: Querschnitt des Heißwasserteils im Stahlwerk A

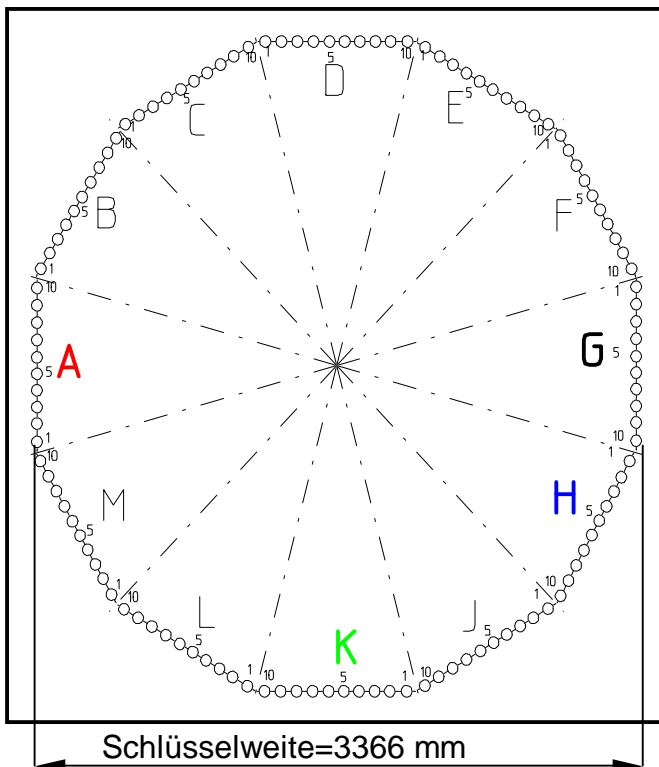
Der Heißwasserteil hat eine Schlüsselweite von 4020 mm und die Länge des gesamten Heißwasserteils beträgt 7910 mm. Der Heißwasserteil ist zwischen der 17 m- und 25 m-Ebene aufgebaut.

Im an den Heißwasserteil anschließenden **Naturumlaufteil** sind über den Umfang 176 Rohre verteilt. Die Rohre haben einen Außendurchmesser von 63,5 mm und eine Wanddicke von 5 mm. Auch in diesem Bereich sind die Rohre mit den Stegen gasdicht verschweißt. Die Teilung beträgt in diesem Teil 76 mm. Als Werkstoff wird ebenso 15 Mo 3 verwendet. Die Schlüsselweite des Naturumlaufteils liegt bei 4052 mm.

Bei dem im Anschluss an den Naturumlaufteil folgender **Zwangsumlaufteil** sind 256 Rohre über den Umfang verteilt. Die Rohre, die auch in diesem Teil aus 15 Mo 3 sind, weisen einen Außendurchmesser von 38 mm und eine Wanddicke von 4,5 mm aus. Die Teilung der Rohr-Steg-Rohr Verbindungen wird mit 52,3 mm angegeben.

Stahlwerk B

Die beiden Abhitzekessel beim Stahlwerk B bestehen aus drei Kaminschüssen (Schuss I, II und III), Abbildung 4-4. Die Schüsse sind jeweils aus 12 geraden Mantelteilen zu einem 12-Eckquerschnitt zusammengeschweißt. Die Mantelteile wurden aus Rohren $D_a = 57 \times 4,5$ mm und dazwischen angeordneten Stegen (Flachstahl 6 x 18 mm) zusammengeschweißt. Die beiden obersten Kaminschüsse (Schuss I + II) haben eine Schlüsselweite von 2806,5 mm mit 120 Rohren im Mantelumfang (12 Segmente mit je 10 Rohren), während der untere Kaminschuss (Schuss III) mit einer Schlüsselweite von 3366 mm 144 Rohre (12 Segmente mit je 12 Rohren) enthält. Der Querschnitt des Kaminschusses III und die Bezeichnungen der Sektionen (Rohrwände) ist **Abbildung 4-5** zu entnehmen.



Legende: A-M: Bezeichnung der

Abbildung 4-5: Querschnitt des Kaminschusses III im Stahlwerk B

Der Kaminschuss III ist in einem Winkel von 20° z ur Vertikalen geneigt angeordnet und schließt auf dem Niveau + 31,287 m an den Kaminschuss II an. Zum Übergang von der 20° - Winkellage zum vertikalen Kaminteil sind am unteren Ende der Rohre in Kaminschuss II Wabbelbögen (gebogene Rohre $D_a = 57 \times 4,5$ mm mit einem Biegeradius von $1,5 \times D$ und einer Schenkellänge von 160 mm) eingebaut. Die Schüsse mit ca. 14 bis 20 m Länge wurden aus Rohren mit einer Maximallänge von 8 m hergestellt.

5 Bisherige Schadensbilder

5.1 Auswertung verfügbarer Dokumentation

Für Stahlwerk A ist eine Dokumentation nicht vorhanden.

Eine Zusammenstellung aller Schäden, die von 1990 bis 1994 an den beiden Abhitze-kesseln K1 und K2 des Stahlwerks B festgestellt wurden, ist /2/ zu entnehmen. Insgesamt wurden in diesem Zeitraum bei Abhitzeessel K1 (LD-Kessel 1) 225 Reparaturen und bei Abhitzeessel K2 (LD-Kessel 2) 281 Reparaturen gezählt. Alle Störungen wurden in Schadenskategorien unterteilt. Die Häufigkeit der einzelnen Störungsarten ist in **Tabelle 5-1** für beide Abhitzeessel zusammengestellt.

Störungsart	absolute (prozentuale) Anzahl der Reparaturen LD-Kessel 1	absolute (prozentuale) Anzahl der Reparaturen LD-Kessel 2
Flossenrisse ^{1)*}	14 (6,2 %)	7 (2,5 %)
Querrisse	120 (53,3 %)	164 (58,4 %)
Leckagen	10 (4,4 %)	4 (1,4 %)
zu geringe Wanddicke	59 (26,3 %)	88 (31,3 %)
Schweißnahttrisse ^{2)*}	17 (7,6 %)	6 (2,1 %)
sonstige Schäden	5 (2,2 %)	12 (4,3 %)
Gesamt	225(100 %)	281(100 %)

1)* Bezeichnung von Stahlwerk B gewählt. Richtige Bezeichnung ist "Steg-Rohr-Längsrisse".

2)* Bei der verwendeten Bezeichnung Schweißnahttrisse ist nicht klar, welche Schweißnähte damit betroffen sind.

Tabelle 5-1: Zusammenstellung der Schadenshäufigkeit

In **Abbildung 5-1** sind die einzelnen Störungsarten getrennt über der Höhenlage des Abhitzekeessels K1 (LD-Kessel 1) graphisch dargestellt.

Man erkennt hierbei, dass

- **Flossenrisse** bisher nur im Kaminschuss III festgestellt wurden.
- **Querrisse** bisher nur in den Kaminschüssen II und III auftraten. Die Verteilung zeigt, dass hiervon 87,5 % aller Querrisse im Kaminschuss III liegen und eine deutliche Abnahme der Störungshäufigkeit über der Kesselhöhe festzustellen ist.
- **Leckagen** nur vereinzelt im Kaminschuss III auftraten.
- **zu geringe Wanddicken** der Steigrohre in allen drei Kaminschüssen festgestellt wurden.
- **Schweißnahttrisse** bisher nur im Kaminschuss III festgestellt wurden.
- **sonstige Schäden** ebenfalls in allen drei Kaminschüssen auftraten.

In der **Abbildung 5-2** sind die einzelnen Störungsarten getrennt über der Höhenlage des Abhitzekeessels K2 (LD-Kessel 2) graphisch dargestellt. Man erkennt hierbei, dass

- **Flossenrisse** bisher nur im Kaminschuss III festgestellt wurden.
- **Querrisse** in allen drei Kaminschüssen auftraten. Die Verteilung zeigt weiter, dass hiervon 71 % aller Querrisse im Kaminschuss III und 25 % aller Querrisse im Kaminschuss II liegen, wobei eine Abnahme der Störungshäufigkeit über der Kesselhöhe festzustellen ist.
- **Leckagen** nur vereinzelt im Kaminschuss III auftraten.
- **zu geringe Wanddicken** der Steigrohre in allen drei Kaminschüssen festgestellt wurden.
- **Schweißnahttrisse** bisher nur im Kaminschuss III festgestellt wurden.
- **sonstige Schäden** ebenfalls in allen drei Kaminschüssen auftraten.

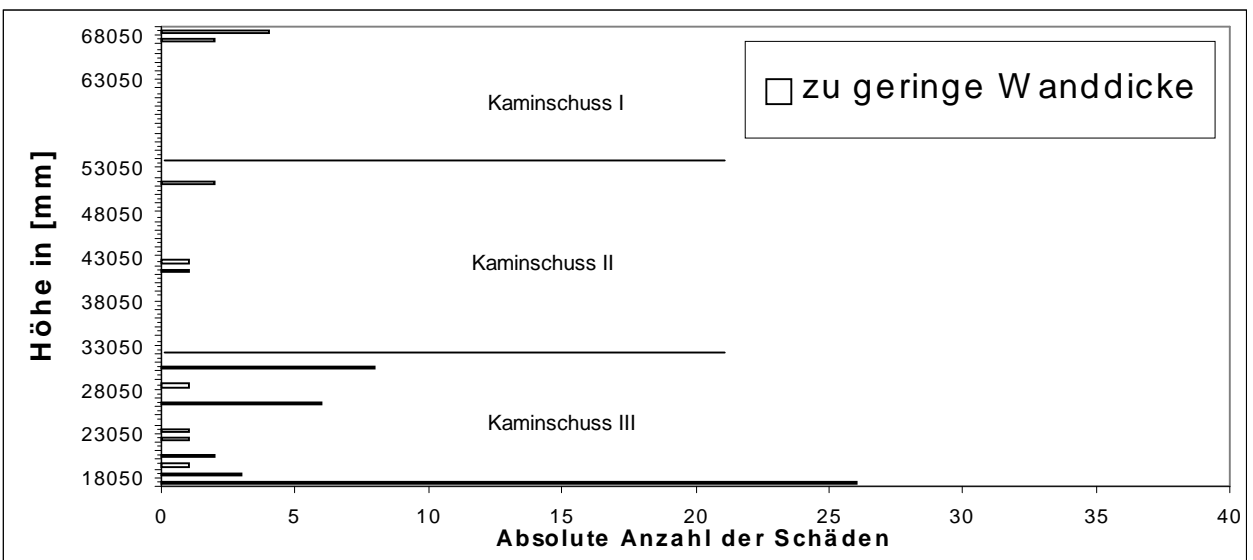
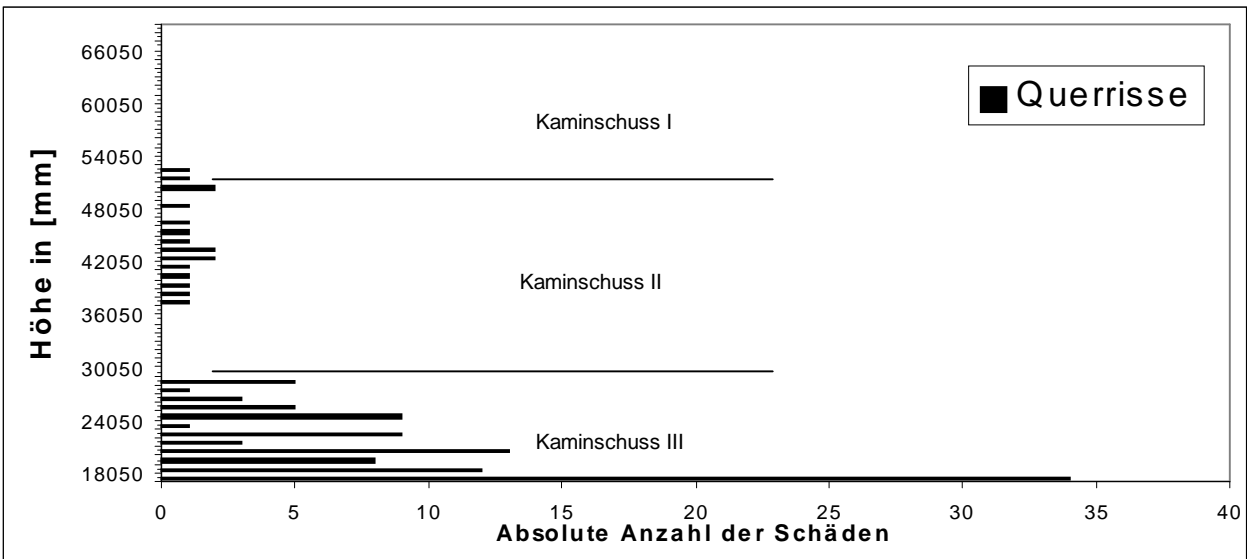
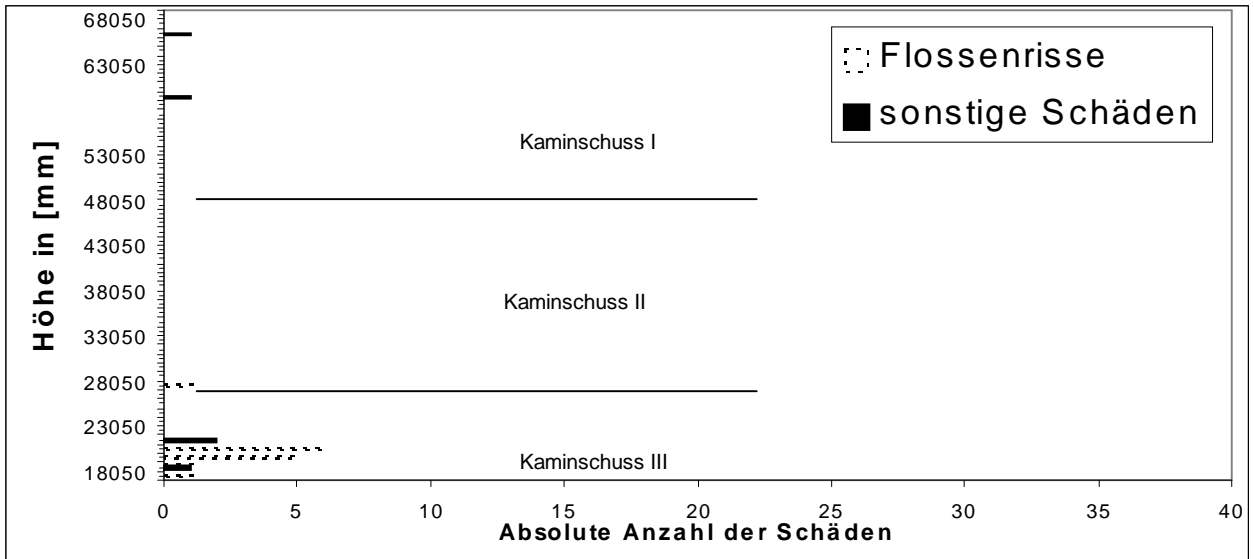


Abbildung 5-1: Störungsarten Kessel 1

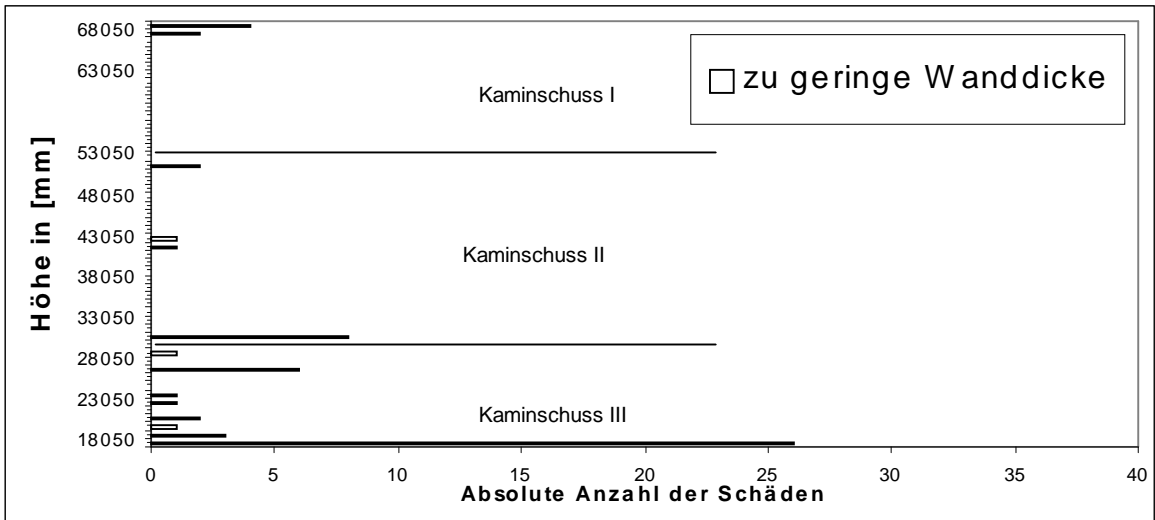
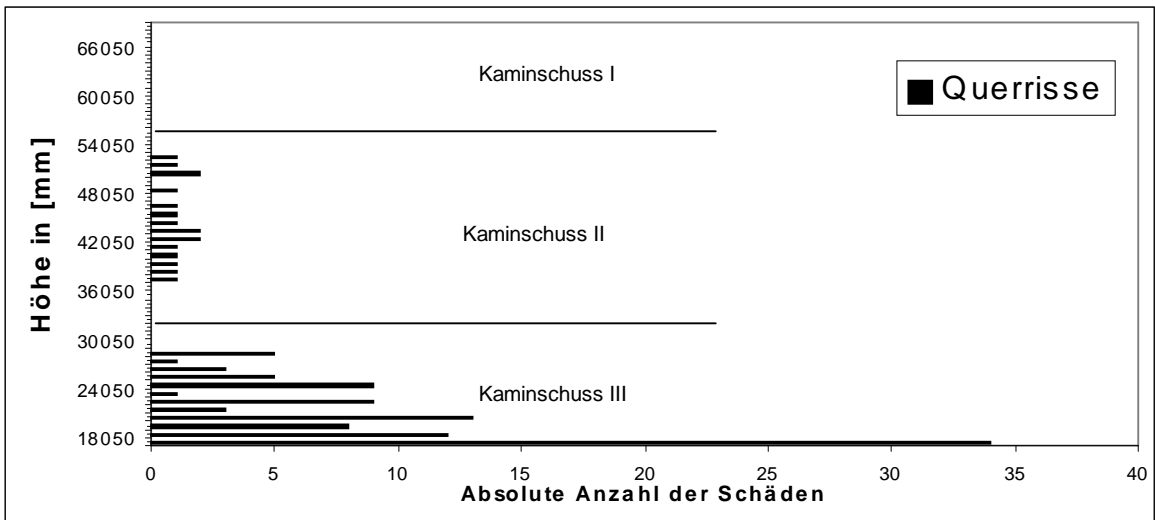
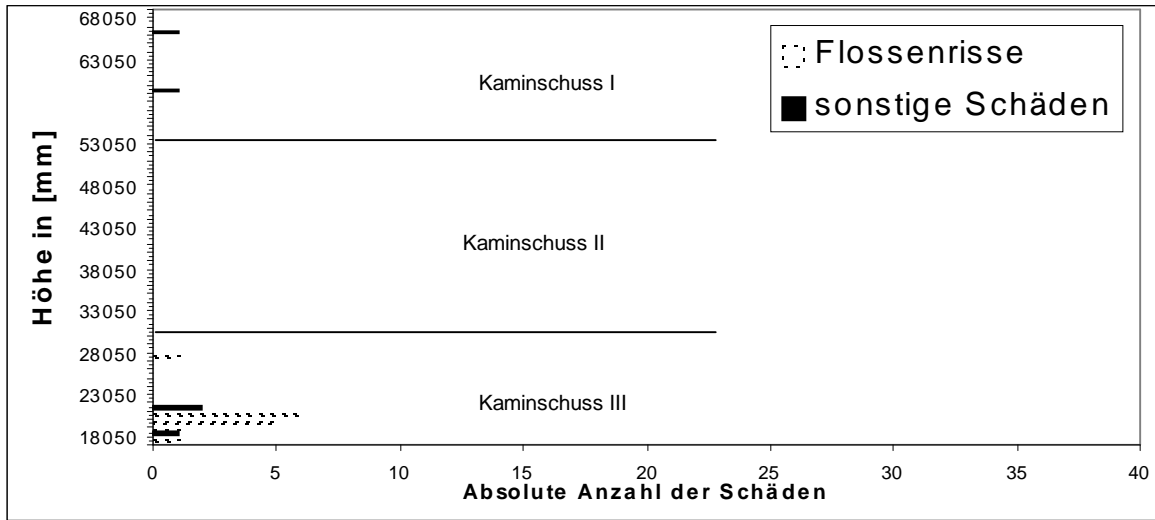
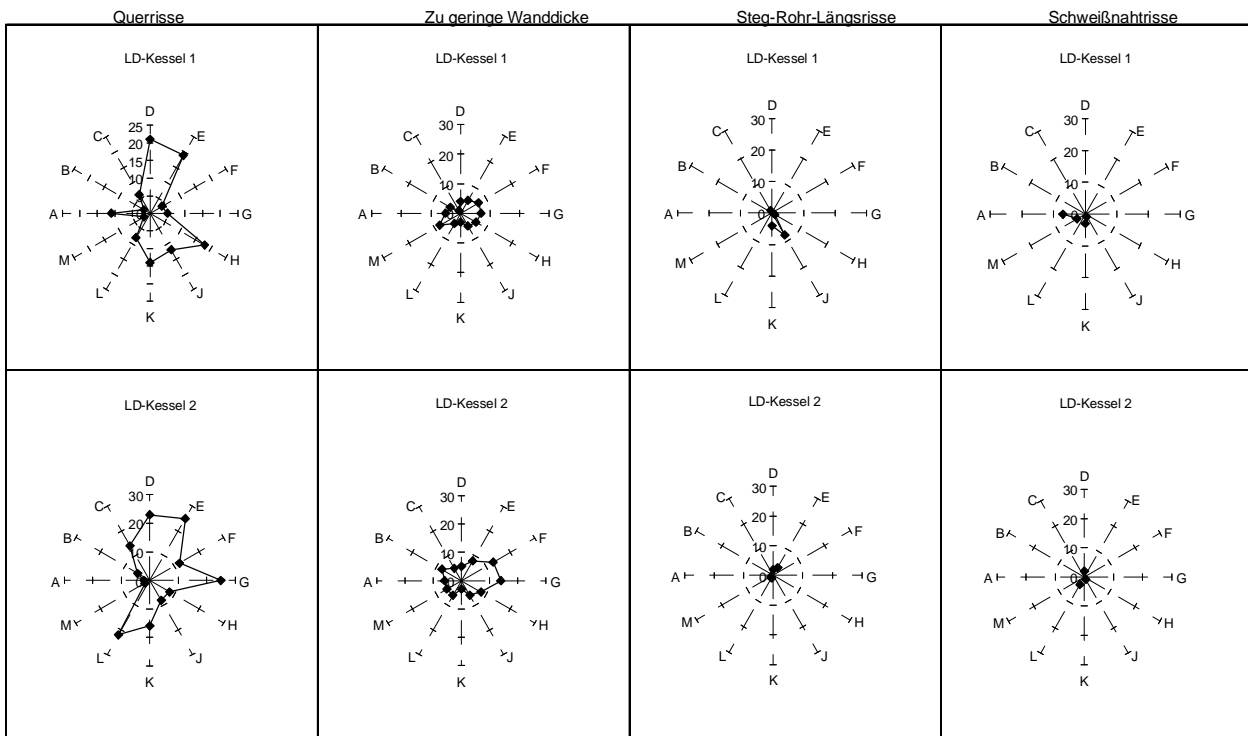


Abbildung 5-2: Störungsarten Kessel 2

In **Abbildung 5-3** ist die Anzahl der einzelnen Störungsarten über den Sektionen für LD-Kessel 1+2 dargestellt. Man erkennt eine Häufung von Querrissen für beide Kessel in den Sektionen D bis L und eine Häufung von Wanddickenminderungen für beide Kessel in den Sektionen D bis J sowie den Sektionen L, M, A, B. Die Steg-Rohr-Längsrisse traten bei LD-Kessel 1 bisher in den Sektionen C und H bis K und bei LD-Kessel 2 in den Sektionen D, E sowie L, M auf.



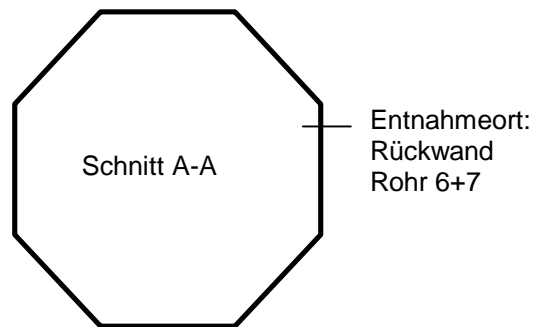
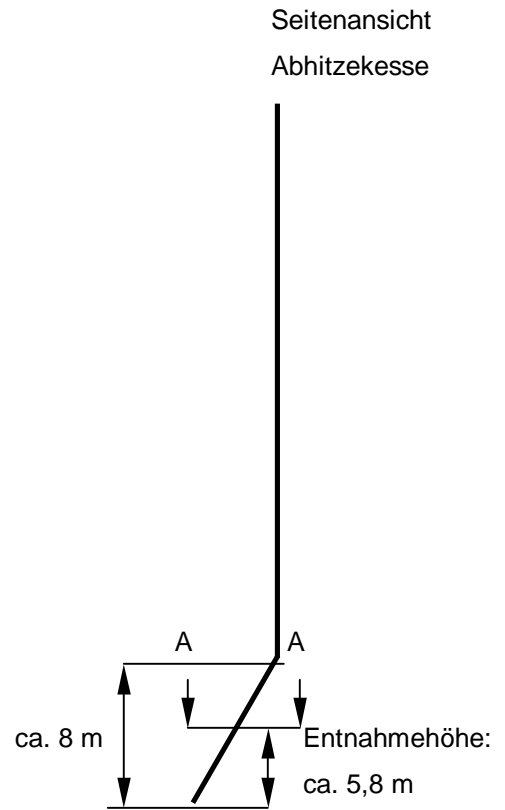
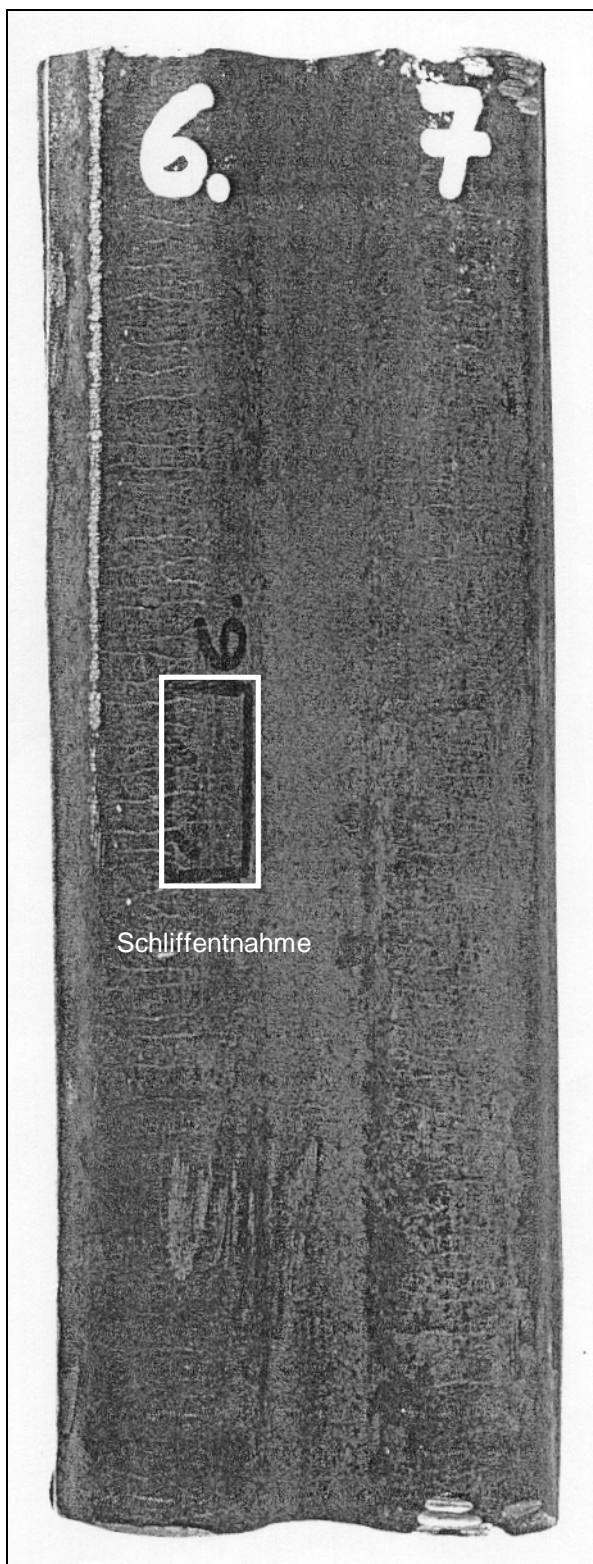
K-A-D-vorderer Bereich; D-G-K-hinterer Bereich; Rückwand: Sektion G

Abbildung 5-3: Anzahl der einzelnen Störungsarten über die Sektionen

5.2 Querrisse

Stahlwerk A-Querrisse

Beim 1992 umgebauten Abhitzekeessel 1 des Stahlwerks A traten im Heißwasserteil schon nach 2,5 Betriebsjahren zahlreiche Querrisse im Bereich der Rückwand auf. Im Abstand von einigen Millimetern erstrecken sich die Risse quer zur Rohrlängsachse /3/. Sie umlaufen den halben Umfang des Rohres und stoppen erst im Anschweißbereich der Stege, siehe **Abbildung 5-4**. Die Schlitze in **Abbildung 5-5** zeigen zahlreiche Risse, die von der Rauchgasseite ausgehen und schon teilweise die ganze Rohrwand durchdrungen haben. In **Abbildung 5-6** sind einige mikroskopische Aufnahmen der transkristallin verlaufenden Querrisse erfasst.



Maßstab: 1:1

Abbildung 5-4: Makroskopische Aufnahmen der Kesselrohre Nr. 6 und 7

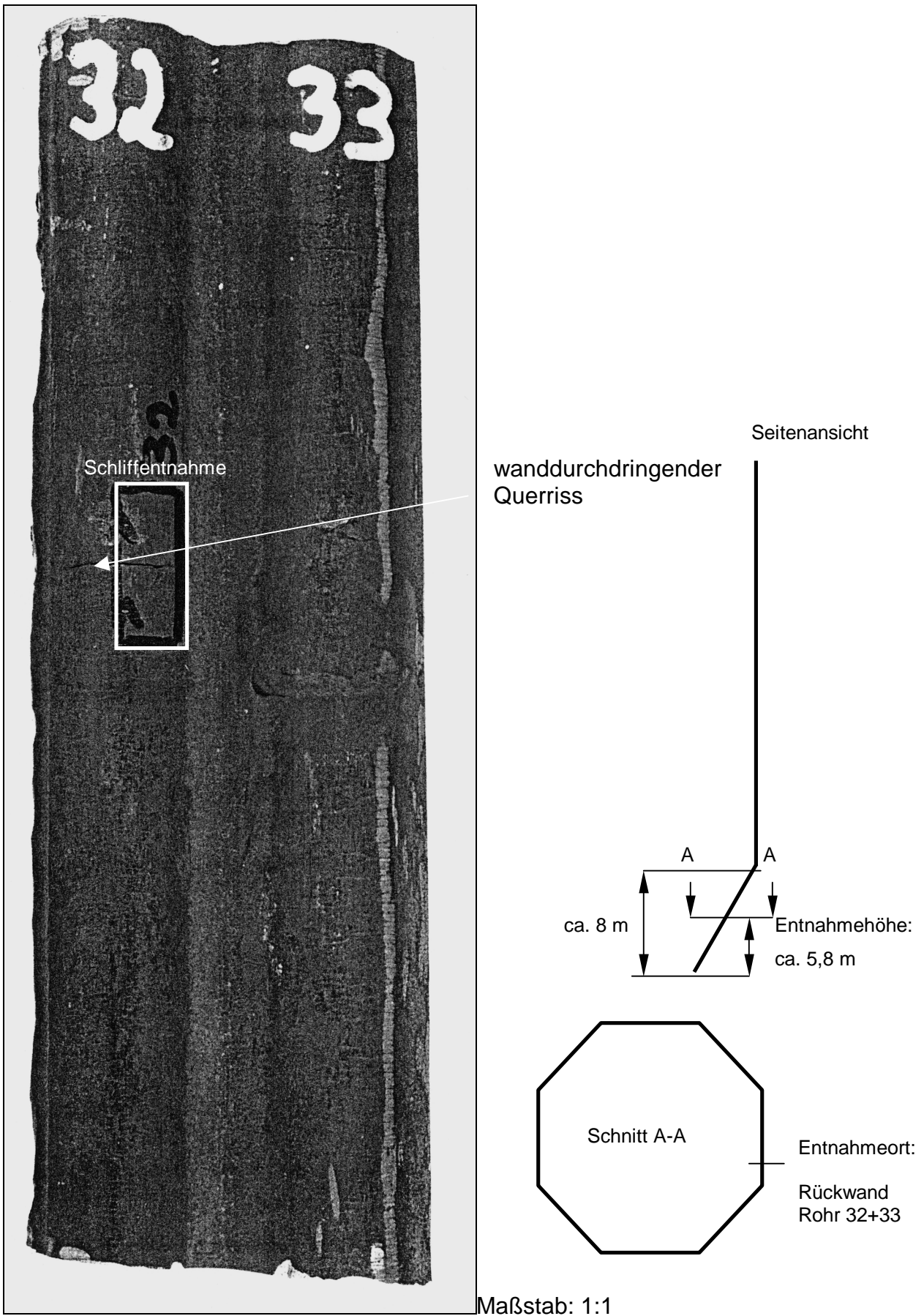
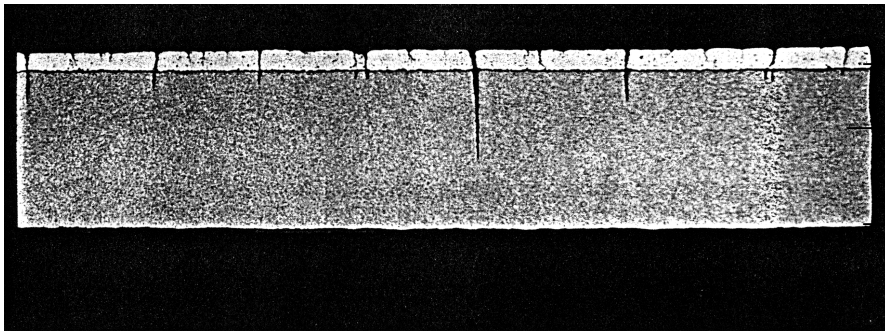


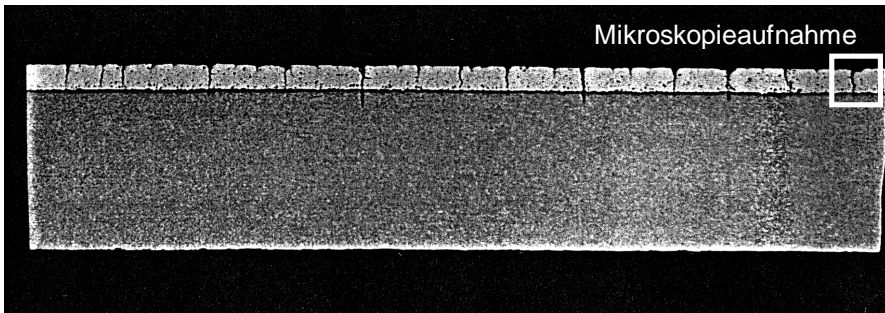
Abbildung 5-5: Makroskopische Aufnahmen der Kesselrohre Nr. 32 und 33



Beschichtung
Grundwerkstoff

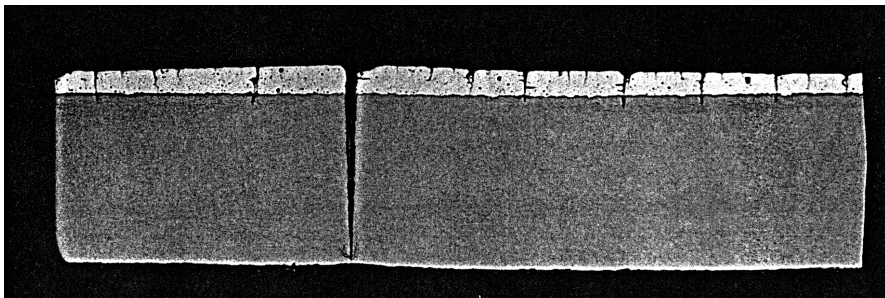
Wasserseite

Schliff 1 Kesselrohr Nr. 6, Entnahmeort siehe Abbildung 5.4

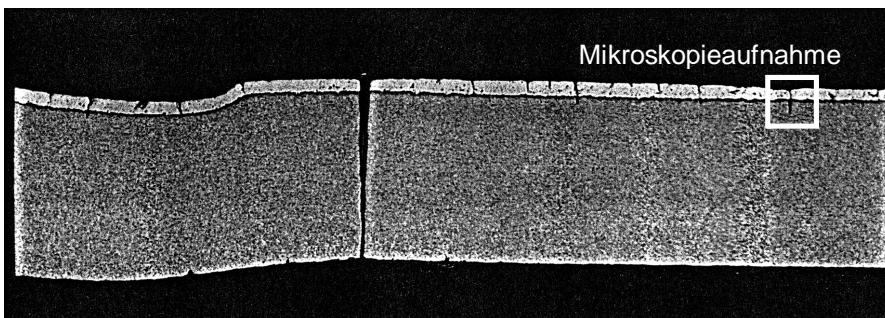


Mikroskopieaufnahme

Schliff 2 Kesselrohr Nr. 8



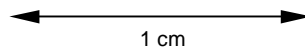
Schliff 3 Kesselrohr Nr. 30



Mikroskopieaufnahme

Schliff 4 Kesselrohr Nr. 32, Entnahmeort siehe Abbildung 5.5

Maßstab aller Schlitze: 4:1



1 cm

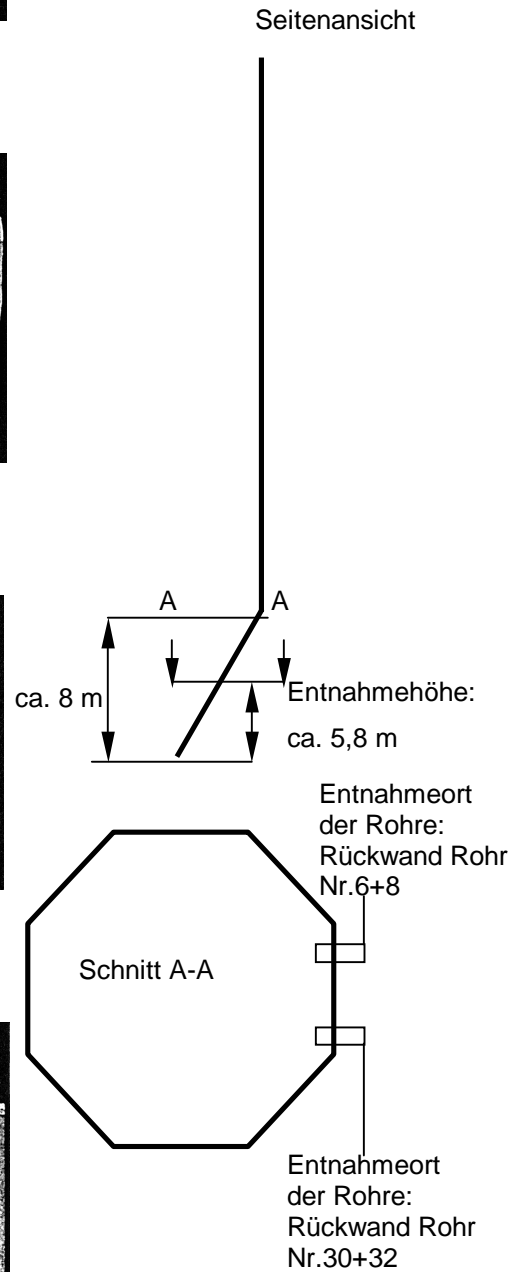
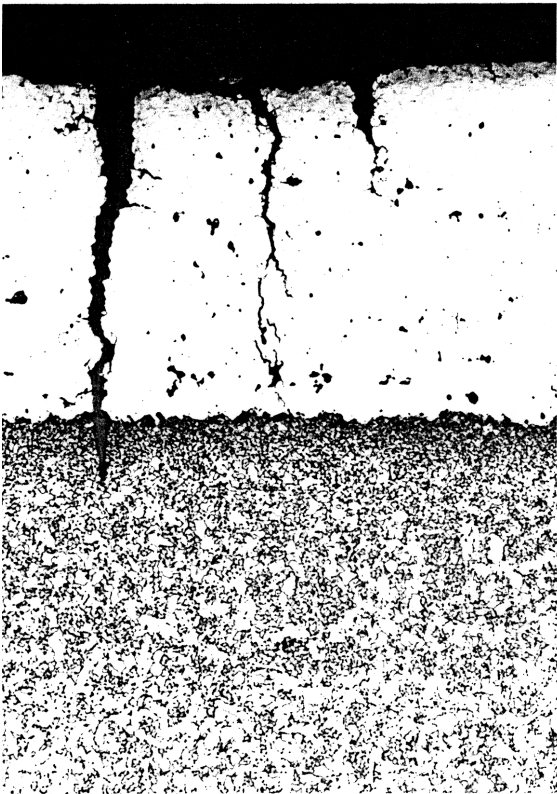
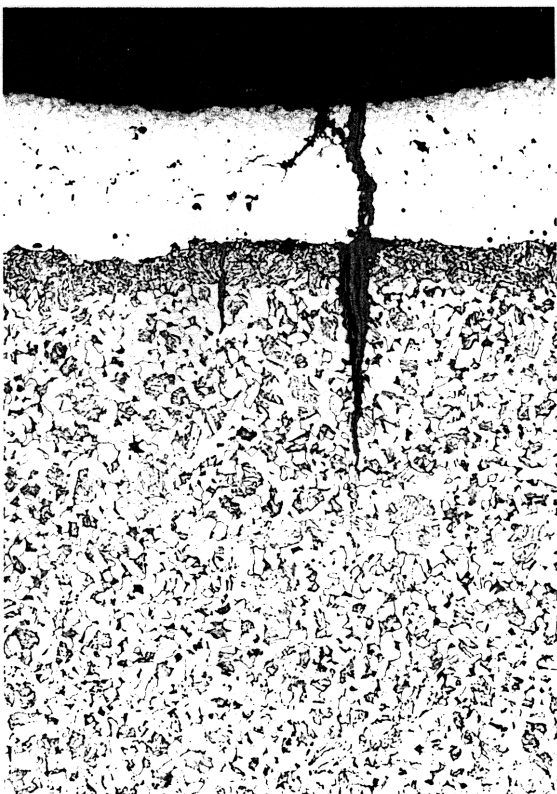


Abbildung 5-6: Schlitze aus Kesselrohren Nr. 6, 8, 30, 32



Probe Rohr Nr. 8
Aufnahmeort siehe Abbildung 5-6,
Schliff 2



Probe Rohr Nr. 32
Aufnahmeort siehe Abbildung 5-6,
Schliff 4

Maßstab: 50:1

Abbildung 5-7: Mikroskopische Aufnahmen

Die ersten Schadensuntersuchungen an innenberippten Rohren mit einer Sinterbeschichtung wurden 1998 schon nach etwa 6 Monaten (etwa 4000 Chargen) durchgeführt /4/. Die Entnahmeorte der Rohrzwillinge aus der linken Seitenwand, der Rückwand und der rechten Seitenwand sind in **Abbildung 5-8** dargestellt.

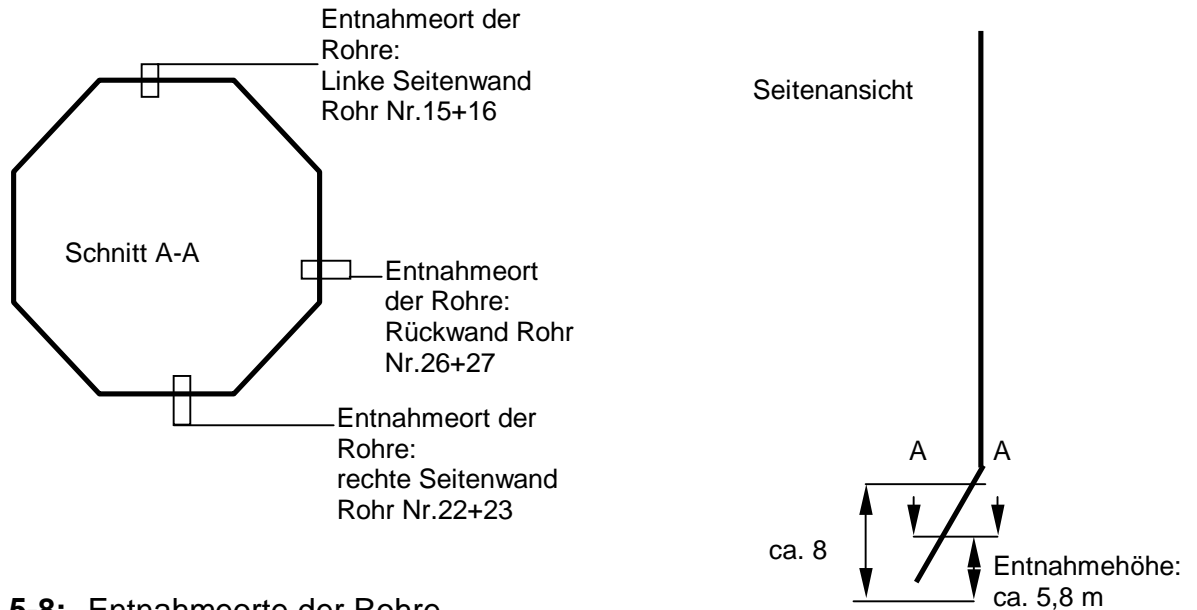


Abbildung 5-8: Entnahmeorte der Rohre

In den **Abbildungen 5-9 bis 5-11** sind die makroskopischen Aufnahmen der entnommenen Rohrzwillinge aus der linken Seitenwand, der Rückwand und der rechten Seitenwand dokumentiert. In der linken und der rechten Seitenwand sind deutlich zahlreiche querorientierte Anrisse zu erkennen. In der Rückwand ist eine Ausrichtung der Anrisse in Querrichtung nur andeutungsweise erkennbar. In den **Abbildungen 5-12 und 5-13** sind einige Schliffe aus diesen Rohren dokumentiert. Teilweise ist eine 50 %-ige Durchdringung vorhanden. Die Risse verlaufen transkristallin. Die maximalen Risstiefen wurden für die linke Seitenwand mit 3,3 mm, für die rechte Seitenwand mit 2,5 mm und für die Rückwand mit 1,7 mm ausgemessen. Daraus errechnen sich Risswachstumsraten bei 4000 Lastwechsel (entspricht 4000 Chargen im halben Jahr) von

- $\frac{3,3 \text{ mm}}{4000 \text{ Lastzyklen}} = 8,25 \cdot 10^{-4} \text{ mm / Lastwechsel}$ für die linke Seitenwand
- $\frac{1,7 \text{ mm}}{4000 \text{ Lastzyklen}} = 4,25 \cdot 10^{-4} \text{ mm / Lastwechsel}$ für die Rückwand und
- $\frac{2,5 \text{ mm}}{4000 \text{ Lastzyklen}} = 6,25 \cdot 10^{-4} \text{ mm / Lastwechsel}$ für die rechte Seitenwand