

Strukturintegritäts – Anwendungen 1

Dr. Prodán Miklós

Tit.-Universitätsdozent

Mérnöki szerkezetek integritása 1
német nyelvű kurzus: **Papierwalze**

(Tárgyfelelős: Dr. Májlinger Kornél, tszv. egyet. docens
“Materialkunde” & “Metalltechnologie”)

2021/2022/1

Ausblick auf weitere Anwendungsbeispiele



Verkauf und Produktentwicklung

SULZER BUDAPEST

Ihr langjähriger PARTNER

Sehr geehrte Damen und Herren!

1985 wurde SULZER BUDAPEST offiziell gegründet. Die Präsenz in Ungarn von SULZER geht aber viel weiter zurück. Erste Investitionen von Sulzer-Produkten sind bereits vor dem zweiten Weltkrieg erfolgt. SULZER BUDAPEST ist Ihr kompetenter, lokaler Partner, sowohl in der Projektierungsphase, aber auch in Ihrer Betriebsphase, durch Unterstützung in Ihren Produktionsprozessen. In den vergangenen 15 Jahren haben wir enge Kontakte mit allen wichtigen und bekannten Firmen und Instituten der Öl-, Chemie-, Energie-, Pharma-, Papier- und Dienstleistungsindustrie auf- und ausgebaut. Wir legen viel Wert darauf, daß wir über den Zustand Ihrer Sulzer-Produkte und -Leistungen ständig informiert sind, um Sie noch besser unterstützen zu können.

Unsere wichtigsten Produkte, Anlagen und Dienstleistungen sind:

- Im Bereich Sulzer Industries: - Textilmaschinen
- Kolonnen
- Pumpen
- Kompressoren
- Turbokompressoren
- Kälteanlagen
- Kühltürme
- Getreidekühlgeräte
- Kristallisationsanlagen
- Mischer
- Klimaanlage
- Service und Unterhalt

Im Bereich Sulzer Medica: - Herzklappen

Vor einigen Jahren haben wir unsere Strategie dem veränderten Umfeld angepasst und unsere Produktpalette, unter Nutzung von Synergien, optimal ergänzt. Wir vertreten jedoch nur solche Firmen, die unsere Standardqualität und den hohen Stand unserer Dienstleistungen garantieren können.

- Unsere Partnerfirmen sind: - Voith Sulzer: Papiermaschinen
- Andritz: Papiermaschinen
- CTU: Verbrennungs- und Rauchgasreinigungsanlagen
- Vatech Wabag: Abwasserreinigungs- und Schlamm-trocknungsanlagen
- CCI: Ventile für Kraftwerke
- Ferrum: Zentrifugen
- Padberg: Zentrifugen
- Sailer: Verbrennungs- und Rauchgasreinigungsanlagen
- Comber: Filter, Trockner
- Pink: Trockner
- Lakos: Filter
- Pieralisi: Dekanter
- GIG: Eindampfanlagen

Einige wichtige Referenzen im ungarischen Markt finden Sie auf den folgenden Seiten.

Unser besonderer Dank und das Vertrauen das wir genießen dürfen, gilt in erster Linie unseren werten Kunden. Wir können Ihnen versichern, dass wir jederzeit für Sie da sind und wir freuen uns auch weiterhin auf eine gute und für beide Seiten erfolgreiche Zusammenarbeit.

Hochachtungsvoll

J. Prodan

SULZER

Labor für Spannungsanalysen
und Materialverhalten
M. Prodan

Protokoll Nr. 2050

Abteilung 1502
Mai 1989

Risswachstumsdaten und bruchmechanische Abschätzungen zur Walze aus St 52-3

(Neue Walze für Monticello)

Auftraggeber: Hr. W. Schuwerk, SEWR PT 921
Auftragsnummer: 03-103.1048

Verteiler:

- 3 Ex. Dipl.-Ing. W. Schuwerk, SEWR PT 921
1 Ex. Dipl.-Ing. F. Edel, SEWR Q162
1 Ex. Dr. Ing. H.O. Asbeck, SEWR Q160
1 Ex. Dr. Ing. W. Seider, SEWR PT922
1 Ex. Dr. H.J. Martens, 1502-1
1 Ex. Dr. M. Prodan, 1502-1
1 Ex. Sekretariat, 1502

Inhaltsverzeichnis und Problemstellung

SULZER

Inhalt

1. Problemstellung
2. Literaturangaben K_{IC} , ΔK_o , die für St 52-3 gelten können
3. Berechnungsmöglichkeiten für ΔK_o und da/dN
4. Berechnung von ΔK für halbelliptische Oberflächen- und elliptische Innenrisse
5. Allgemeine Eingabedaten für die Berechnungen
6. Rechenergebnisse ΔK_o nach Gl. (3)
7. Rechenergebnisse tolerierbare Rissgrößen
 - 7.1 Oberflächenrisse
 - 7.2 Innenrisse
8. Rechenergebnisse $a = a(N)$
9. Zusammenfassung; Vorschläge zur Verbesserung der bruchmechanischen Sicherheit
10. Literaturverzeichnis

-2-

SULZER

1. Problemstellung

Die neue Walze für Monticello ist aus St 52-3 gefertigt, und die nächsten 3 Walzen werden aus demselben Material gebaut.

Im vorliegenden Protokoll soll eine bruchmechanische Bewertung aufgrund einer Literaturrecherche sowie der Kenntnisse bei Ko.St. 1502 erfolgen.

Zum vorangehenden Protokoll Nr. 2045/1502 von Herrn Panic sei hinzugefügt, dass nebst Korrosionsermüdung bzw. Schwingungsrissskorrosion (SWRK) in einem Fall noch ein rissartiger Schweißfehler ("welding fault") als Ursache des frühzeitigen Walzenbruchs mitgewirkt hatte.

Im folgenden soll also auch der Frage von tolerierbaren (zulässigen) Fehlern nachgegangen werden: Welche Abmessungen dürfen die zulässigen Fehler haben? Mit welcher Sicherheit ergeben diese Fehler zusammen mit den gegebenen (mechanischen, korrosiven) Beanspruchungen ΔK - Spannungsintensitätsfaktoren, welche sicherlich unterhalb des Schwellwertes für Ermüdungsrisssausbreitung (ΔK_{td} oder ΔK_o) liegen? Sind die zulässigen Fehlerabmessungen gross genug um mit zFP (zerstörungsfreier Prüfung, z.B. Ultraschall) feststellbar zu sein?

2. Literaturangaben K_{IC} , ΔK_o , die für St 52-3 gelten können

Laut W.U. Zammert (Betriebsfestigkeitsberechnung, Vieweg, Braunschweig, 1985, S. 170) sind für St 52-3

$$R_e = 310 \text{ Nmm}^{-2}$$

$$K_{IC} = 4000 \text{ Nmm}^{-3/2}$$

(Die entsprechenden Kennwerte für St 37-2 - früheres Walzenmaterial der Schadenfälle - sind laut derselben Quelle

$$R_e = 230 \text{ Nmm}^{-2}$$

$$K_{IC} = 3000 \text{ Nmm}^{-3/2}.)$$

In Fig.1 aus Ref. [1] geben wir ein $da/dN = f(\Delta K)$ - Diagramm an, das für den Stahl Ck45 (DIN 17200) bei $R = 0,8$ an Luft ermittelt wurde (Prüffrequenz 25 Hz).

-3-

Referenzdiagramme da/dN versus ΔK

SULZER

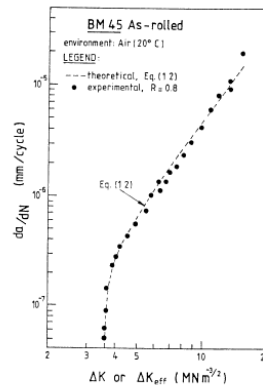


Fig. 1 da/dN versus ΔK für Ck45 bei R = 0,8 an Luft [1]

Der Verlauf von da/dN über ΔK würde für St 52-3 (wäre das Diagramm verfügbar für uns) nicht viel anderes als von Fig. 1 aussehen. (Zitat vom Supervisor und Dittautor von [1]: "I guess that the line for your steel is not much different.")

Somit ist eine vertretbare Abschätzung für St 52-3, abgelesen aus Fig. 1:

$$\Delta K_0 \approx 3,5 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}} = 110 \text{ Nmm}^{-3/2}$$

Man beachte zudem, dass in Ref. [1] auch eine Theorie des "Near-threshold Region"-Ermüdungsrisswachstums skizziert wird. Auf diese Theorie werden wir noch zurückgreifen.

Fig. 2 zeigt ein Referenzdiagramm nach J.R. Yates und K.J. Miller für einen 3,5% NiCrMoV-Stahl (Fatigue Pract. Engng. Mater. Struct., Vol. 12, 1989, No. 3, p. 262). Dieser Fall ist jedoch - obwohl der Schwellwert ΔK_0 nach diesem bedeutend (Faktor 2!) besser wäre - weniger vergleichbar mit unserem Fall, u.a. war mit R = 0,1 ein ganz anderes Belastungsverhältnis, und ΔK_0 ist ja auch von R abhängig.

-4-

SULZER

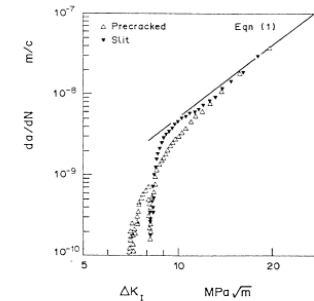


Fig. 2 da/dN versus ΔK für Stahl 3,5% NiCrMoV bei R = 0,1 an Luft.

3. Berechnungsmöglichkeiten für ΔK_0 und da/dN

Nach [5] ist das Gesetz für Risswachstum vereinfacht das folgende:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad (1)$$

für $\Delta K > \Delta K_0$ und

$$\frac{da}{dN} = 0 \quad (2)$$

für $\Delta K < \Delta K_0$.

Ref. [1] gibt zusätzlich noch eine von Gl. (1) abweichende, kompliziertere Gleichung für das "Near-threshold Region" - Risswachstum an.

-5-

Berechnungsmöglichkeiten für ΔK_0 und ΔK

SULZER

Auf die Wiedergabe dieser Gleichung verzichten wir an dieser Stelle. Sie enthält nämlich recht viele zusätzliche Materialparameter (zyklische Verfestigungsexponente, Burgers-Vektor, Poissonsche Zahl, zyklische Fließspannung, usw.), welche die Situation recht kompliziert machen und welche für das betreffende Material (z.B. St 52-3 in unserem Fall) vorher experimentell zu bestimmen wären. Verallgemeinert lässt sagen, dass diese Gleichung theoretisch begründbar ist und sinngemäss ein langsames Risswachstum ergibt als Gl. (1).

Schliesslich ergibt sich nach Ref. [2] und [4] die mit Gl. (3) und Fig. 3 dargestellte Beziehung:

$$\frac{\Delta K_0(R)}{E} = (2.75 \pm 0.75) \cdot 10^{-5} (1-R)^{0.31} (\sqrt{m}) \quad (3)$$

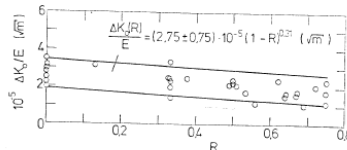


Fig. 3 $\Delta K_0/E$ als Funktion des Spannungsverhältnisses R , Daten nach [2,4].

Allerdings widerspiegelt Gl. (3) keine Theorie, sondern nur eine rechentechnische "Normierung".

Das Streuband in Fig. 3 ist zudem recht breit; es wurden darin ja recht verschiedene Experimente aus [2] zusammengefasst.

SULZER

4. Berechnung von ΔK für halbelliptische Oberflächen- und elliptische Innenrisse

In Anlehnung an [6,7] lässt sich folgende Gleichung angeben:

$$\Delta K = \frac{\Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}}{\Phi} \cdot f(\text{Rissgeometrie}) \quad (4)$$

worin:

ΔK : zyklischer Spannungsintensitätsfaktor (lokal variierend entlang der Rissfront)

$\Delta \sigma$: zyklische Normalspannung (senkrecht auf die Rissebene)

a : Risstiefe des Oberflächenrisses; kleine Halbachse des ellipt. Innenrisses

Φ : ellipt. Integral zweiter Art; Rissformfaktor (im Falle einer Plastizitätskorrektur auch mit Q bezeichnet)

c : halbe Risslänge (grosse Halbachse der Ellipse)

$f(\text{Rissgeometrie})$: Korrekturfunktion (im Falle des Oberflächenrisses z.B. $f(\frac{a}{c}, \psi, \frac{a}{t})$)

ψ : Winkel bei Parameterdarstellung der Ellipse

t : Wanddicke bei Oberflächenriss; halbe Wanddicke bei Innenriss

Zur Frage der halbelliptischen Oberflächen- und/oder elliptischen Innenfehler kann folgendes bemerkt werden: Glücklicherweise ist der leichter zu beobachtende (zfp) erstgenannte Fall in bruchmechanischer Sicht gefährlicher.

Beim Rechnen mit Gl. (4) ist noch etwas zu beachten. Gl. (4) kann mit den Korrekturfunktionswerten aus [7] sehr genaue Resultate liefern. Vielfach genügen aber auch einfachere Korrekturfunktionen, die auch leichter zu handhaben sind. Zum Nachschlagen steht eine Reihe von ausgezeichneten Kompendien, K-Faktoren-Katalogen (z.B. die "blaue Mappe" von Sulzer) zur Verfügung.

Eingabedaten und Rechenergebnisse ΔK_0 , a & c

SULZER

Einen Teil der bis jetzt theoretisch erörterten Rechenverfahren können wir mit Hilfe eines geeigneten, einigermaßen universellen Computer-Software an einem IBM-PC durchführen. Einige Ergänzungen wurden durch Handrechnungen mit einem Taschenrechner gemacht.

5. Allgemeine Eingabedaten für die Berechnungen

Werkstoff: St 52-3
DIN-Nr. 1.0570

Temperatur= 50°C
 $R_{p0,2}$ = 315 MPa
 R_m = 490 MPa
E-Modul = $2,1 \cdot 10^5$ MPa

Obere Spannung: σ_{max} = 125 MPa

Untere Spannung: σ_{min} = 75 MPa

Ersatz-Eingabedaten:

Bruchzähigkeit K_{IC} = 127 MPa $\cdot\sqrt{m}$ $\approx$ 4000 Nmm $^{-3/2}$

Rissfortschrittskonstanten:

$C = 6,8 \cdot 10^{-10}$ (mm/LW ; MPa $\sqrt{m}$) $n = 3,57$

Schwellwert gegen Rissausbreitung:

$\Delta K_0 = 5$ MPa $\cdot\sqrt{m}$ = 158 Nmm $^{-3/2}$

Diese Ersatz-Eingabedaten wurden durch das Programm (PC-Software) erstellt. Sie können nicht nur als Default-Werte angesehen werden, sondern greifen auf deutsche Werkstoff-Datenbank-Werte (DIN, DECHEMA, usw.) zurück.

-8-

SULZER

6. Rechenergebnisse ΔK_0 nach Gl. (3)

Setzen wir unsere Eingabedaten in Gl. (3) von Abschnitt 3 ein, so erhalten wir

$$\Delta K_0 = (2,75 \pm 0,75) \cdot 10^{-5} \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 31,6 = (182 \pm 49) \text{ Nmm}^{-3/2},$$

das heisst

$$\Delta K_0 = 133 \text{ Nmm}^{-3/2} \text{ als unteren Wert bei } R = 0$$

und

$$\Delta K_0 = (2,75 \pm 0,75) \cdot 10^{-5} \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 0,4^{0,31} \cdot 31,6 = (137 \pm 37) \text{ Nmm}^{-3/2}, \text{ das heisst}$$

$$\Delta K_0 = 100 \text{ Nmm}^{-3/2} \text{ als unteren Wert bei } R = 0,6.$$

7. Rechenergebnisse tolerierbare Rissgrößen

7.1 Oberflächenrisse

Tab.1 Beispiele tolerierbare Oberflächenrisse

a (mm)	c (mm)	N (LW)	Delta K(a) (MPa $\cdot\sqrt{m}$)	Delta K(c)	a/c	a/t
2.5	35	0	4.99	1.45	0.070	0.025
2	400	0	4.60	0.35	0.005	0.020
6	6	0	4.6	5.0	1.000	0.060
1	10	0	3.13	1.10	0.100	0.010

-9-

Tolerierbare Oberflächen- und Innenrisse

SULZER

Bei den in Tab.1 aufgeführten Rissen gilt, dass die Rissbeanspruchung ΔK niedriger ist als der Ermüdungsschwellwert ΔK_0 ; Risswachstum ist bei der vorliegenden Rissgrösse und Belastung und dem gegebenen ΔK_0 nicht möglich.

Ein 2mm tiefer Oberflächenriss ($a = 2\text{ mm}$, heutzutage durch zFP durchaus feststellbar) kann demzufolge sehr lang sein ($2c \approx 800\text{ mm}$).

Allerdings kann ein viel kürzerer Riss ($2c \approx 70\text{ mm}$) kaum tiefer sein ($a = 2,5\text{ mm}$), um noch als "tolerierbar" zu gelten.

Als "tiefsten" Riss können wir den halbkreisförmigen mit $a = 6\text{ mm}$ und $2c = 12\text{ mm}$ ansehen.

In allen diesen drei Fällen wagten wir uns sehr nah an den Schwellwert $\Delta K_0 = 5\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ an. Tatsache ist jedoch, dass selbst bei diesem ΔK_0 überlagert auf die "Vorspannung" bei $R = 0,6$ wir einen Sicherheitsabstand von rund 10 bezüglich Spannung oder Spannungsintensitätsfaktor ($127/12,5 \approx 10$) oder $\gg 10$ bezüglich Rissabmessungen ($10^2 \gg (\sqrt{a_0} \cdot f(a_0) / \sqrt{a} \cdot f(a))^2 \gg 10$) gegenüber Kritikalität bei K_{IC} haben. ΔK_0 in [5] als "bruchmechanische Dauerfestigkeit" genannt - liegt eben viel niedriger als K_{IC} .

Würden wir die vierte Zeile von Tabelle 1 mit $a = 1\text{ mm}$ und $2c = 20\text{ mm}$ als sogenannten "zulässigen" Riss betrachten, dann hätten wir zu ΔK_0 einen Faktor 1,6 oder bloss Faktor 1,1 " Bemessungs"-Abstand, je nachdem ob wir $5\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ oder $3,5\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ für ΔK_0 annehmen.

7.2 Innenrisse

Tab.2 Beispiele tolerierbare Innenrisse

a (mm)	c (mm)	N (LW)	Delta K(a) (MPa $\sqrt{\text{m}}$)	Delta K(c) (MPa $\sqrt{\text{m}}$)	a/c	a/t
3	35	0	4.85	1.42	0.086	0.06
7.5	7.5	0	4.95	4.950	1.000	0.15
1.5	20	0	3.438	0.941	0.075	0.03

-10-

SULZER

Vergleicht man die Resultate von Tab.2 mit Tab.1, so lässt sich zum vorher Gesagten zusätzlich noch anmerken, dass Innenfehler grössere Abmessungen annehmen dürfen (z.B. $2a = 6\text{ mm}$, $2c = 70\text{ mm}$ oder $2a = 3\text{ mm}$, $2c = 40\text{ mm}$) als entsprechende Oberflächenfehler.

Tab.2 wurde mit denselben Spannungen wie Tab.1 berechnet. Dies bedeutet einen gewissen, zusätzlichen Konservatismus, da im Inneren der Wanddicke (Beanspruchung im wesentlichen Biegung!) die Spannungen i. allg. kleiner sind als an der Oberfläche und die ungefährlichen Risse können umso grösser sein.

8. Rechenergebnisse $a = a(N)$

Tab.3 Beispiel falls $\Delta K > \Delta K_0$

Oberflächenriss

a (mm)	c (mm)	N (LW)	Delta K(a) (MPa $\sqrt{\text{m}}$)	Delta K(c) (MPa $\sqrt{\text{m}}$)	a/c	a/t
2.600	34.667	0	5.091	1.534	0.075	0.026
11.366	35.334	12661877	9.637	6.037	0.322	0.114
22.080	39.008	16317484	11.784	9.904	0.566	0.221
32.794	46.387	18331762	13.369	12.788	0.707	0.328
43.508	56.697	19623120	15.137	15.464	0.767	0.435
54.222	69.136	20450334	17.157	18.277	0.784	0.542
64.936	83.336	20979949	19.417	21.384	0.779	0.649
75.650	99.234	21321558	21.906	24.871	0.762	0.756
86.364	116.934	21544775	24.598	28.772	0.739	0.864
97.078	136.624	21693510	27.423	33.052	0.711	0.971
99.026	140.437	21714912	27.942	33.863	0.705	0.990

Rissfortschrittskonstanten

$$C = 68.0000E-11 \text{ (mm/LW; MPa}\sqrt{\text{m}})$$

$$n = 3.57$$

$$dK_0 = 5.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

In Tab.3 haben wir als Anfangsrisse einen nur um 0,1 mm tieferen Oberflächenriss angenommen als derjenige in der ersten Zeile von Tab.1 war:

$a = 2,6\text{ mm}$ und $2c \approx 70\text{ mm}$.

Da $\Delta K = 5,091\text{ MPa}\sqrt{\text{m}} > \Delta K_0 = 5\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, wurde mit Paris-Typ-Risswachstum gerechnet. Resultat $N = 2,2 \cdot 10^7$ LW bis $a = 99\text{ mm}$ und $2c = 280\text{ mm}$.

Diese Berechnung (Paris-Typ-Risswachstum) ist zu konservativ (vgl. Fig. 1 und 2 in der "Near-threshold Region").

-11-

Verfeinerte Berechnungen

SULZER

Genauer lesse sich z.B. mit einer Gleichung nach Ref. [1] berechnen. Darauf wiesen wir in Abschn. 3 bereits hin.

In Tab.4 machten wir etwas ähnliches, jedoch einfacheres. Wir benutzten nicht die theoretische Gleichung von Ref. [1], sondern die Paris-Gleichung, aber bereichsweise mit verschiedenen Stoffwerten (Rissfortschrittskonstanten). Resultat:

$N_{\text{total}} \approx 1,6 \cdot 10^8$ bis $a = 100$ mm und $2c = 277$ mm, eine Größenordnung grösserer Wert als in Tab.3.

Die bereichsweise Abänderung der Stoffwerte (Stufe 1 und 2) mag auf den ersten Blick willkürlich erscheinen. Sie folgt jedoch die Tendenz der da/dN versus ΔK - Diagramme (vgl. Fig. 1 und 2):

- Bei Stufe 1 ein niedrigerer C-Wert und höherer Exponent m als im "Paris-Bereich";
- Bei Stufe 2 stellen sich etwa die Verhältnisse vom "Paris-Bereich" ein, ausgedrückt mit einem kleineren m- und höheren C- Wert, verglichen mit Stufe 1.

Tab.4 Verfeinerte Berechnung des vorangehenden Beispiels (vgl. Tab. 3).

Stufe 1

Rissfortschrittskonstanten
 $C = 68.0000E-12$ (mm/LW; MPa $\sqrt{m}$) $n = 3.60$ $dK_0 = 5.0$ MPa $\sqrt{m}$

a (mm)	c (mm)	N (LW)	Delta K(a) (MPa $\sqrt{m}$) ^(1/2)	Delta K(c) (MPa $\sqrt{m}$) ^(1/2)	a/c	a/t
2.600	34.667	0	5.091	1.534	0.075	0.026
4.166	34.684	42276813	6.358	2.425	0.120	0.042
6.080	34.769	71115998	7.532	3.469	0.175	0.061
7.994	34.919	87953904	8.445	4.454	0.229	0.080
9.908	35.149	99580691	9.175	5.375	0.282	0.099
11.822	35.473	108437510	9.772	6.233	0.333	0.118
13.736	35.901	115625985	10.268	7.029	0.383	0.137
15.650	36.443	121716164	10.690	7.766	0.429	0.156
17.564	37.103	127030722	11.059	8.452	0.473	0.176
19.478	37.886	131764027	11.389	9.091	0.514	0.195
20.174	38.202	133366590	11.503	9.314	0.528	0.202

-12-

SULZER

Stufe 2

Rissfortschrittskonstanten
 $C = 68.0000E-11$ (mm/LW; MPa $\sqrt{m}$) $n = 3.00$ $dK_0 = 5.0$ MPa $\sqrt{m}$

a (mm)	c (mm)	N (LW)	Delta K(a) (MPa $\sqrt{m}$) ^(1/2)	Delta K(c) (MPa $\sqrt{m}$) ^(1/2)	a/c	a/t
20.200	38.113	0	11.496	9.326	0.530	0.202
27.310	42.564	5485140	12.603	11.368	0.642	0.273
36.000	49.737	11217141	13.950	13.593	0.724	0.360
44.691	58.383	15455052	15.411	15.774	0.765	0.447
53.381	68.200	18601464	17.006	18.051	0.783	0.534
62.071	79.047	20946255	18.737	20.503	0.785	0.621
70.761	90.883	22703040	20.600	23.180	0.779	0.708
79.451	103.734	24028612	22.585	26.109	0.766	0.795
88.142	117.663	25038231	24.666	29.289	0.749	0.881
96.832	132.758	25817083	26.799	32.688	0.729	0.968
99.992	138.556	26056019	27.574	33.964	0.722	1.000

9. Zusammenfassung; Vorschläge zur Verbesserung der bruchmechanischen Sicherheit

- ΔK_c ist ein empfindlicher Schwellwert für Risswachstums-Berechnungen. Gemäss Abschn.3 und der allgemein praktizierten Vereinfachung erfährt die Risswachstumsgeschwindigkeit hierbei einen Sprung von $da/dN = 0$ zu da/dN nach dem Paris-Gesetz.
- Risse, für welche $\Delta K < \Delta K_c$ mit hinreichender Sicherheit nachgewiesen werden kann, können als zulässig gelten. Ein solcher Oberflächenriss ist für die neue Walze aus St 52-3 $a = 1$ mm und $2c = 20$ mm.
- Folgerichtig kann mit dem bruchmechanischen "Rüstzeug" dieses Protokolls gezeigt werden, dass ein Oberflächenfehler $a \approx 5,3$ mm und $2c = 40$ mm und mit dem "alten" Material St 37-3 nichtzulässig ist und zu einem frühzeitigen Schaden führen kann.
- Die Ueberschreitung des Schwellwerts, d.h. $\Delta K > \Delta K_c$, bedeutet meistens "den Anfang von Ende".

-13-

Materialwahl St 52 (S 355) anstatt St 37 (S 235)

SULZER

Sicherheitserhöhende Vorschläge (stichwortartig):

- Anwendung eines besseren C-Stahles, z.B. St 52 anstelle St37;
- Experimentelle Bestimmung von ΔK_0 ;
- Genauere Gleichungen anstelle der Paris-Gleichung bei Berechnung des "Near-threshold Region"-Risswachstums (vgl.Fig. 1 und Abschn. 3);
- Genauere Erfassung der korrosiven Einflüsse, d.h. SWRK in Leitungswasser und nicht nur ΔK_0 an Luft;
- Überprüfung der Vereinfachungen der Spannungsanalyse und der Spannungs-Eingabedaten bei der Berechnung von ΔK (Lastspannungen, Eigenspannungen).

-14-

SULZER

10. Literaturverzeichnis

- [1] L. Guerra-Rosa/C.M. Branco/J.C. Radon: Prediction of thresholds using cyclic properties of materials. In: Fracture Control of Engineering Structures (Ed. H.C. van Elst and A. Bakker), EMAS Warley, U.K., 1986, p. 1321-1332
- [2] L.P. Pook: Fatigue crack growth data for various materials deduced from the fatigue lives of precracked plates. In: ASTM STP 513, Philadelphia, Pa., USA, 1972, p. 106-124
- [3] P.C. Paris et al.: Extensive study of low fatigue crack growth rates in A 533 and A 508 steels. Ibidem, p. 141-176
- [4] K.-H. Schwalbe: Bruchmechanik metallischer Werkstoffe, Carl Hanser Verlag, München, Wien 1980, p.401
- [5] W. Stumpp: Grundsätzliche Aspekte der Ermüdung. Sulzer, 7. ERFA-Konferenz Materialtechnik, 28. April 1981, p. 26-27
- [6] M. Prodan: Special computations and experiments with the flaw assessment model "Surface crack in a tensile plate". VDI Berichte Nr. 679, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1988, p. 173-184
- [7] I.S. Raju / J.C. Newman, Jr.: Stress-intensity factors for a wide range of semi-elliptical surface cracks... Engin. Fract. Mech., Vol. 11, (1979), No. 4, p. 817-829

-15-