Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 98 (1980)

Heft: 51-52

Artikel: Die Bedeutung der Defektanalyse in der Ermüdung geschweisster Aluminium-Tragwerke

Autor: Jaccard, Robert

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-74296

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 04.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die Bedeutung der Defektanalyse in der Ermüdung geschweisster Aluminium-Tragwerke

Von Robert Jaccard, Zürich

Einleitung

Aluminium ist dank seiner mechanischen Eigenschaften und seiner rationellen Bearbeitungsmöglichkeiten zum unentbehrlichen Werkstoff im Fahrzeugbau geworden. Die beachtenswerten Vorteile der *Grossprofiltechnik* vermögen selbst schwerwiegende Nachteile im Vergleich zu Stahl, wie zum Beispiel *Elastizitätsmodul* und *Metallpreis*, aufzuheben.

Die Bilder 1 bis 3 zeigen erfolgreiche Anwendungen auf dem Gebiet der Schienenfahrzeuge. Die ersten beiden stellen die neue Fahrzeugreihe Metro Paris vor. Auf Bild 2 erkennt man im Hintergrund einen Wagenkasten im Rohbauzustand. Davor befindet sich ein Stapel typischer Hohlkammerprofile für die Bodenstruktur und den Dachgurt. Selbst Fahrzeuge mit härtesten Betriebsbedingungen, wie etwa Kohlewagen, sind dank der erwähnten Grossprofilbauweise in Aluminium realisierbar. Auf Bild 3 ist der Montagezustand eines Kohlewagen-Prototypes für die weltbekannte amerikanische Eisenbahngesellschaft Santa Fe abgebildet. Dieses Fahrzeug weist eine Tragkapazität von 120 t auf.

Die Wirtschaftlichkeit der Aluminium-Anwendung wird am Beispiel eines Kohlezuges von 2650 t Gewicht, bestehend aus 50 Wagen aus Stahl ersichtlich. Ersetzt man die Stahlfahrzeuge durch Einheiten aus Aluminium, werden zum Transport derselben Kohlemenge bloss 44 Wagen benötigt. Dies entspricht einer Einsparung von etwas mehr als 10 Prozent an Rollmaterial. Zusätzlich gewinnt man mehr als 40 Prozent an Zugsgewicht bei Leerfahrten.

Die Anwendung der Grossprofiltechnik setzt auf der einen Seite *geeignete Schweissverfahren* voraus. Schweissen ermüdungsbeanspruchter Aluminiumbauteile bedarf auf der anderen Seite *besonderer Aufmerksamkeit in der Bemessung und Fabrikation*. Dazu sind Grundlagen und Verfahren notwendig, wie sie in der gegenwärtigen Ermüdungsforschung zur Verfügung stehen.

Ermüdungsforschung nach dem Prinzip der Rissausbreitung

Im Gegensatz zum klassischen *Wöhlerverfahren* sind die Methoden, die das Phänomen der Metallermüdung aufgrund der Rissausbreitung beschreiben, *dreiparametriger* Natur (Tabelle I).

Der *erste* Parameter, die *Rissausbreitungsrate*, RAR, ist eine werkstoffspezifische Grösse, die in erster Linie vom Bereich der Spannungsintensität ΔK, des *Lastspektrums* und der *umgebenden Atmosphäre* abhängt. Die Rissausbreitungsrate wird anhand spezieller Proben nach verschiedenen bewährten Verfahren [1,2,3] labormässig bestimmt und die Messergebnisse durch eine Regressionsanalyse der da/dN und ΔK

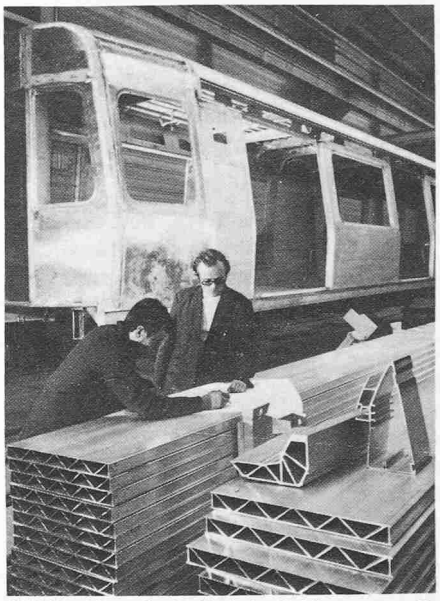


Bild 2. Metro Paris: Typische Hohlkammerprofile für Bodenkonstruktion und Dachgurt

Bild 1. Metro Paris: Anwendung der Grossprofiltechnik

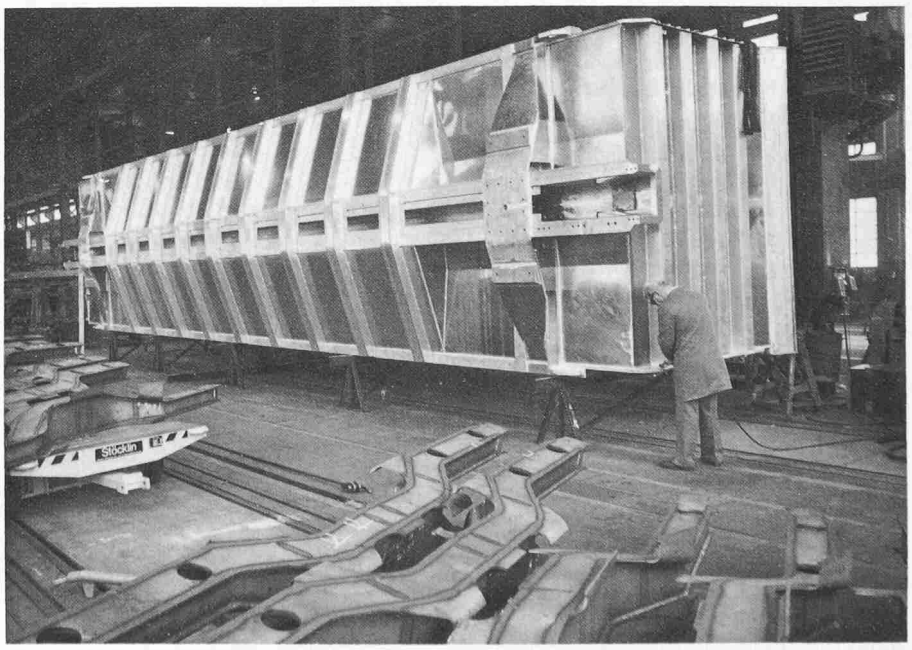


Bild 3. Rohbau Kohlewagen USA Tragkapazität 1,200 MN

Werte in doppelt logarithmischer Darstellung ausgewertet [4].

Dieses Ergebnis dient zur Definition des unter dem Namen *P.C. Paris* bekannten Ermüdungsgesetzes:

(1) $da/dN = C(\Delta K)^n$

Der *zweite* Parameter berücksichtigt Defekte in Form einer anfänglichen Rissgrösse gegeben durch Ermüdung, Fabrikations- oder Werkstoffehler. Die Rissgrösse wird anhand der *Defektanalyse* bestimmt.

Der *dritte* Parameter stellt ähnlich wie bei den Wöhlerkurven die Spannungsdifferenz, die *Wirkung der Belastung in Form des Bereiches der Spannungsintensität* dar. Sie ist das Resultat einer mathematisch physikalischen Berechnung oder der Effekt des bruchmechanischen Modelles. Die Spannungsintensität selbst ist, wie der Name andeutet, eine Grösse, die das lokale Spannungsfeld um die Risskante beschreibt [5].

Da jedes räumliche Spannungsproblem in eine Ebene abgebildet und somit durch eine Normalspannung und zwei Schubspannungen dargestellt werden kann, sind zur konkreten Beschreibung des Spannungsfeldes um die Risskante *drei Arten von Spannungsintensitäten* notwendig.

Wie die Erfahrung im Umgang mit Ermüdungsrissen zeigt, verlaufen die Risse meist in Richtung der Hauptdruckspannung. In diesen Fällen genügt es, bloss eine Spannungsintensität, nämlich jene für den *Normalspannungseinfluss, senkrecht zur Rissfläche* K_I (Modus 1) zu berücksichtigen. Diese Grösse wird im folgenden einfachheitshalber mit K bezeichnet. Die Spannungsintensität unter Normalspannungseinfluss ist im allgemeinen durch folgende Darstellung gegeben:

(2) $K = \sigma \sqrt{a} \cdot y$

und sinngemäss

(3) $\Delta K = \Delta\sigma \sqrt{a} \cdot y$

$K, \Delta K$: Spannungsintensität Modus 1, Bereich der Spannungsintensität

σ: Globalspannung

$\Delta\sigma$: globale Spannungsdifferenz ($\sigma_{max} - \sigma_{min}$)

a: Risslänge

y: Rissgeometriefaktor [im allgemeinen y = y(Rissgeometrie)]

Durch Einsetzen der Beziehung (3) in das Ermüdungsgesetz (1) und Integration lässt sich die Lastspielzahl N berechnen, die ein Riss dazu benötigt, von der anfänglichen Rissgrösse a_1 ausgehend, die Endrissgrösse a_2 zu erreichen (siehe Formel 5).

Da im allgemeinen der Rissgeometriefaktor eine Funktion der Rissgeometrie, insbesondere der Risslänge ist, muss die Integration mittels Computer durchgeführt werden. Bei konstantem Rissgeometriefaktor, Beispiele siehe unten stehende Zusammenstellung, und konstanter Spannungsdifferenz, ergeben sich folgende Ausdrücke für die Lastspielzahl oder die anfängliche Rissgrösse:

(4) $f_i = \dfrac{2}{(n_i - 2) C_i y^{n_i}}$

Betrachtet man die Formel (5), erkennt man den grossen Einfluss der Spannungsdifferenz auf die Lastspielzahl. Der Rissgeometriefaktor ist von derselben Grössenordnung. Die anfängliche Rissgrösse dagegen weist einen um mehr als die Hälfte geringeren Expo-

(5) $$N \Big|_{a_1}^{a_2} = \frac{f_i}{(\Delta\sigma)^{n_i} \, a_1^{\frac{n_i - 2}{2}}} \left[1 - \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^{\frac{n_i - 2}{2}} \right]$$

oder bei gegebenen N und a_2

(6) $$a_1 = \left[\frac{1}{\frac{N(\Delta\sigma)^{n_i}}{f_i} + \frac{1}{a_2^{\frac{n_i - 2}{2}}}} \right]$$

a_1: Risslänge am Anfang des Rissfortschrittes

a_2: Risslänge am Ende des Rissfortschrittes

f_i: Abkürzung gemäss Formel (4)

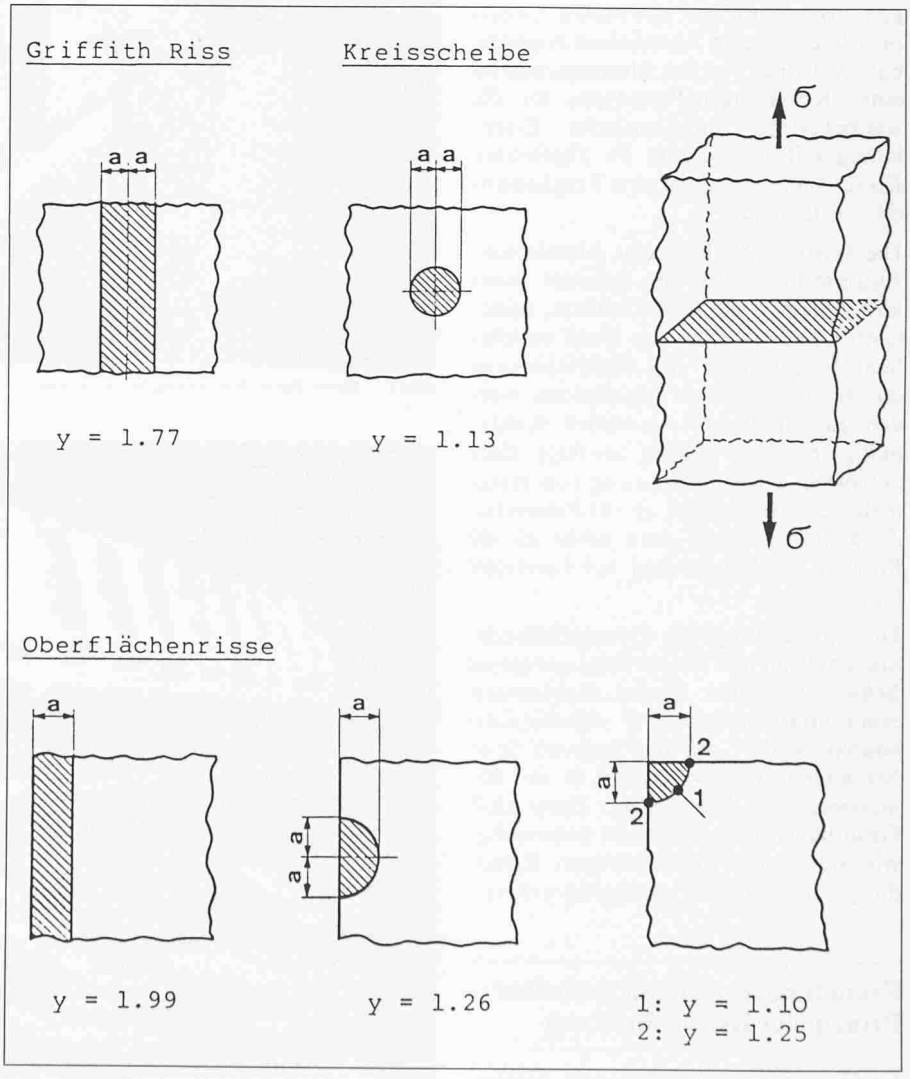
$\Delta\sigma$: Spannungsdifferenz

C_i: Konstante der Rissausbreitung (*) siehe Tabelle III

n_i: Exponent der Rissausbreitung (*) siehe Tabelle III

(*): gültig im Intervall i, d. h. $\Delta K_i \leq \Delta K \leq \Delta K_i + 1$

N: Lastspielzahl bei der Rissausbreitung von a_1 auf a_2.



Zusammenstellung. Rissgeometriefaktoren für unendliche Probendimension bzw. den elstischen Halbraum gemäss STP 381, ASTM 1970 [5], [14]

nenten auf. Anfängliche Rissgrösse und Rissgeometriefaktor sind charakteristische Eigenschaften des Defektes. Demzufolge erscheint der Defekteinfluss gleich zweimal in Formel (5). Darin erkennt man die Bedeutung der Defekte und die Notwendigkeit einer Analyse für deren quantitative Beschreibung.

Die Defektanalyse

Zweck

Die Hauptaufgabe der Defektanalyse ist es, anfängliche Rissgrössen bzw. Rissgeometrien zu definieren und statistische Angaben über deren Streuung anzugeben. Dazu dienen die im nächsten Abschnitt beschriebenen Hilfsmittel.

Hilfsmittel

In Tabelle II sind die Hilfsmittel der Defektanalyse dargestellt. Die *Fraktographie*, die Beschreibung der Bruchflächen, ist ein sehr leistungsfähiges Verfahren. Je nach den eingesetzten optischen Geräten unterscheidet man zwischen Makro-, Mikro- oder REM/TEM-Fraktographie. Im Fall der Makrofraktographie erfolgt die Bewertung der Bruchflächen von blossem Auge oder mit einer Lupe bis zu etwa 50facher Vergrösserung.

Für mikrofraktographische Untersuchungen werden *Lichtmikroskope* benützt. Zur Grundlagenforschung, Legierungsentwicklung sowie für Abklärungen spezieller Fragen über Rissausbreitungsrichtung, Ermittlung von Schwingstreifen oder Schadenanalysen werden elektronische Mikroskope, das *Raster* (REM)- oder das *Durchstrahl-Elektronenmikroskop* (TEM), verwendet. Die REM-Technik wird häufig dem TEM-Verfahren vorgezogen, da keine Replikas, d.h. Probenabzüge notwendig sind und relativ grosse Proben bis ca. 1 cm² direkt untersucht werden können.

Die Vermessung von Rissfronten und Defekten ist normalerweise zeitraubend und mit viel Aufwand verbunden. Um dennoch grössere Mengen von Bruchflächen rationell auswerten zu können, wurde vom Autor ein Verfahren entwikkelt, das gestattet, *Bruchflächen über ein Digitalisiergerät mittels Computer* auszuwerten [6, 7]. Bei diesem Verfahren wird zunächst von der zu untersuchenden Bruchfläche eine Makroaufnahme mit Diapositiv gemacht. Dieses wird mittels eines normalen Diaprojektors auf einen Digitalisiertisch projiziert. An diesem Gerät arbeitet ein Analytiker, der zusätzlich noch einen graphischen Bildschirm mit interaktiver Verbindung zu einem Computer zur Verfügung hat. Mit der Digitalisierlupe übernimmt nun der Analytiker die markanten Linien und Details aus der projizierten Bruchfläche, z.B. die Kontur der Endrissgrösse, der Umriss des Bauteiles oder die Kontur des Defektes usw. Durch Druck auf die entsprechende Funktionstaste am Bildschirm werden die gewünschten Rissfronten vom Computer in Sekundenschnelle gerechnet und auf dem Bildschirm dargestellt. Die anfängliche Rissgrösse wird durch Vor- und Rückwärtsrechnen der Rissfronten ermittelt. Im ersten Fall betrachtet man den digitalisierten Umriss des Defektes, im zweiten jenen des Endrisses als Ausgangslage der Rissfront. Die Genauigkeit des makrofotographischen Messverfahrens liegt bei ± 0,01 mm.

Die Segmentierung, d.h. das planmässige, systematische Aufschneiden von Bauteildetails, ist ein weiteres zuverlässiges Verfahren zur Beurteilung von Defekten. Es eignet sich besonders zur Ermittlung des Durchschweissgrades von Schweissnähten irgendwelcher Art. Bild 4 zeigt einen Querschnitt durch den Zusammenschluss von drei Blechen mittels einer V-Naht. Bilder 5 und 6 dokumentieren die Qualitätskontrolle eines Türpfostenanschlusses des Wa-

Tabelle 1. Parameter der Metallermüdung nach dem Gesetz der Rissausbreitung und ihre Abhängigkeit

Rissausbreitungsrate RAR	*Anfängliche Risslänge*	*Bereich der Spannungsintensität*
RAR = da/dN [m/Zyklus]	a_i [m]	ΔK [MPA$\sqrt{m}$]
- Werkstoff	- Zerstörung (Ermüdung)	- Belastung
- ΔK	- Werkstofffehler	- Risslänge
- Lastspektrum	- Konstruktionsdetail	- Geometrie
- Umgebung	- Fabrikation	- σ/ε

Tabelle 2. Hilfsmittel der Defektanalyse

Fraktografie
- Makro (Messlupe bis etwa 50×)
- Mikro (Lichtmikroskope)
- REM/TEM (Elektronenmikroskope)
Segmentierung
- Aetzen
- Diamantfräsen
- Polieren
Bruchmechanik
- analytisch
- numerisch
Ermüdungsmodelle
Statistik

Tabelle 3. Richtwerte obere Schranken der Rissausbreitung von Anticorodal-062 Legierungen. Bei der Berechnung von ΔK sind die Risslängen in Meter und die Spannungen in MPA oder MN/m² einzusetzen

R $\sigma_{min}/\sigma_{max}$	K MPA $\sqrt{m}$	*da/dN* Meter/Zyklus	Exponent *n*	Konstante *C*
0,1	35	$8{,}0\times10^{-6}$	2,84	$3{,}27\times10^{-10}$
	7,5	$1{,}0\times10^{-7}$	7,68	$1{,}90\times10^{-14}$
	4,0	$8{,}0\times10^{-10}$	28,72	$4{,}09\times10^{-27}$
	2,7	$1{,}0\times10^{-14}$		
0,5	35	$8{,}0\times10^{-6}$	2,87	$2{,}96\times10^{-10}$
	5	$3{,}0\times10^{-8}$	3,86	$6{,}01\times10^{-11}$
	2,3	$1{,}5\times10^{-9}$	27,88	$1{,}23\times10^{-19}$
	1,5	$1{,}0\times10^{-14}$		
0,8	35	$8{,}0\times10^{-6}$	3,01	$1{,}82\times10^{-10}$
	1,3	$4{,}0\times10^{-10}$	28,82	$2{,}08\times10^{-13}$
	0,9	$1{,}0\times10^{-14}$		

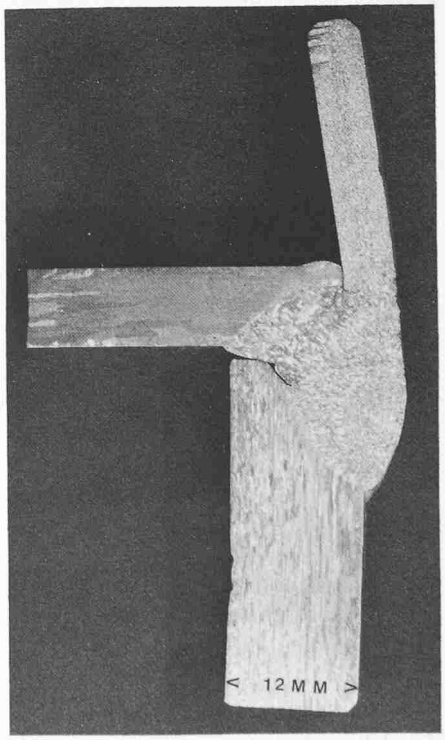


Bild 4. Detail aus Bild 5. Makroschliff mit anschliessender Aetzung der Querschnittsoberfläche zur Sichtbarmachung der Gefügestruktur und allfälliger Schweissrisse

genkastens eines Fahrzeuges der Metro Paris. Bild 7 verweist auf die Möglichkeiten zur Ermittlung der Porosität in Schweissraupen durch gezieltes Fräsen.

Schliesslich bleiben noch die rechnerischen Hilfsmittel der Defektanalyse, die Bruchmechanik, die Ermüdungsmodelle und die Statistik zu erwähnen. Sie dienen zur Simulation von Rissfronten und der quantitativen Beurteilung der fraktographischen Erkenntnisse. Im Rahmen dieses Aufsatzes würde es zu weit führen, diese Methoden näher zu beschreiben [8, 9, 10, 11, 12, 13].

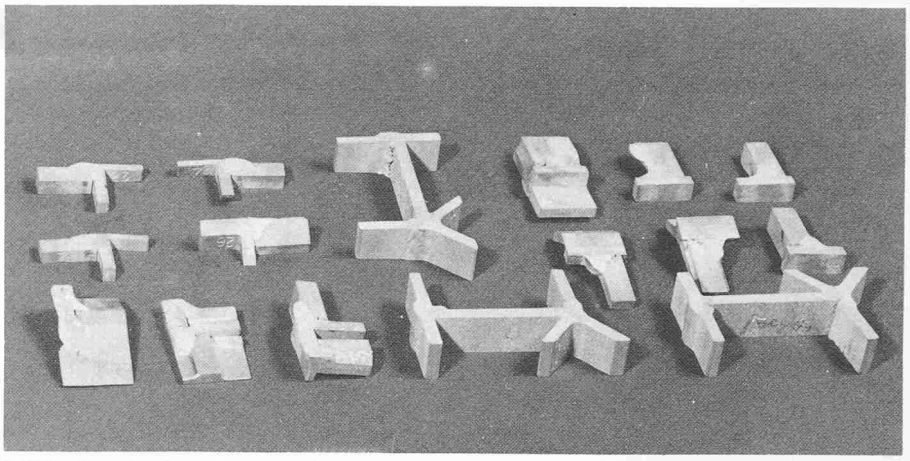


Bild 5. Typischer Querschnitt aus Bild 6

Fraktographische Untersuchungen an Ermüdungsbruchflächen

Die folgenden Bilder mögen einen Einblick in die *Vielgestaltigkeit* der Defekte geschweisster Aluminium-Bauteile geben. Die Aufnahmen stammen aus Ermüdungsversuchen an geschweissten Aluminiumträgern (Bild 8), die im Forschungslabor der Alusuisse in Neuhausen in den letzten Jahren durchgeführt worden sind.

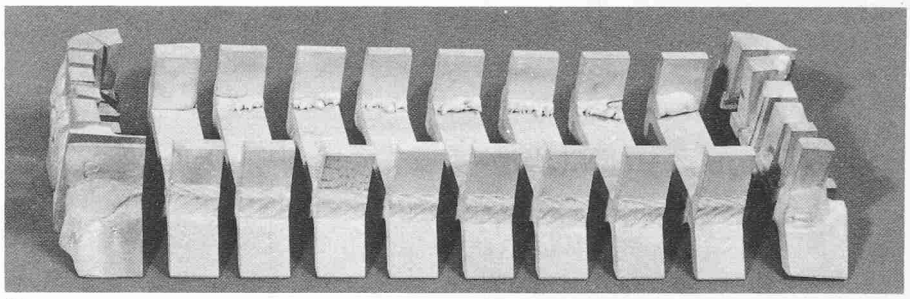


Bild 6. Qualitätskontrolle Türpfostenanschluss Metro Paris durch Segmentierung

Bindefehler und Porosität

Bild 9 zeigt zwei typische Defekte einer Stumpfnaht. Bei der betreffenden Schweissnaht handelt es sich um den Stegblechstoss an einem MIG geschweissten Träger aus Anticorodal-112 Strangpressprofilen und 10 mm Peraluman-460 Blech.

Die Makroaufnahme auf Bild 10 stellt die Defekte im Detail dar. Die dreieckförmige schwarze Fläche misst an der Basis etwa 2,6 mm und weist eine Höhe von 3 mm auf. In dieser Zone fand infolge zu geringer Temperatur keine Aufschmelzung des Grundmaterials statt. Da ohne diesen Schmelzvorgang keine einwandfreie Bindung zwischen Schweissgut und Grundwerkstoff möglich ist, wird im Bereich des Bindefehlers jegliche Kraftübertragung verhindert. Dieser Bereich stellt wegen seiner Form und seiner Orientierung senkrecht zur Hauptzugspannung einen Defekt dar, der als scharfkantiger Riss im Sinne der Bruchmechanik aufgefasst werden darf. Über diesem Bindefehler erkennt man ein langgestrecktes Porennest, bestehend aus ungefähr zehn Poren mit Durchmessern zwischen 0,3 bis 1 mm.

Obwohl *Poren* keine eigentlichen Risse im bruchmechanischen Sinne darstellen, sind sie nicht zu unterschätzende Quellen für angehende Ermüdungsrisse. Wenn Poren gruppenweise als Nester auftreten, sind sie in ihrer Wirkung

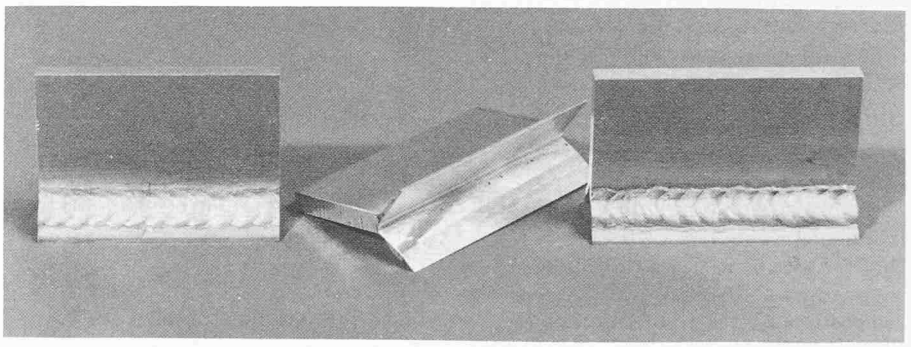


Bild 7. Durch Schichtfräsen freigelegte Poren in Schweissraupen

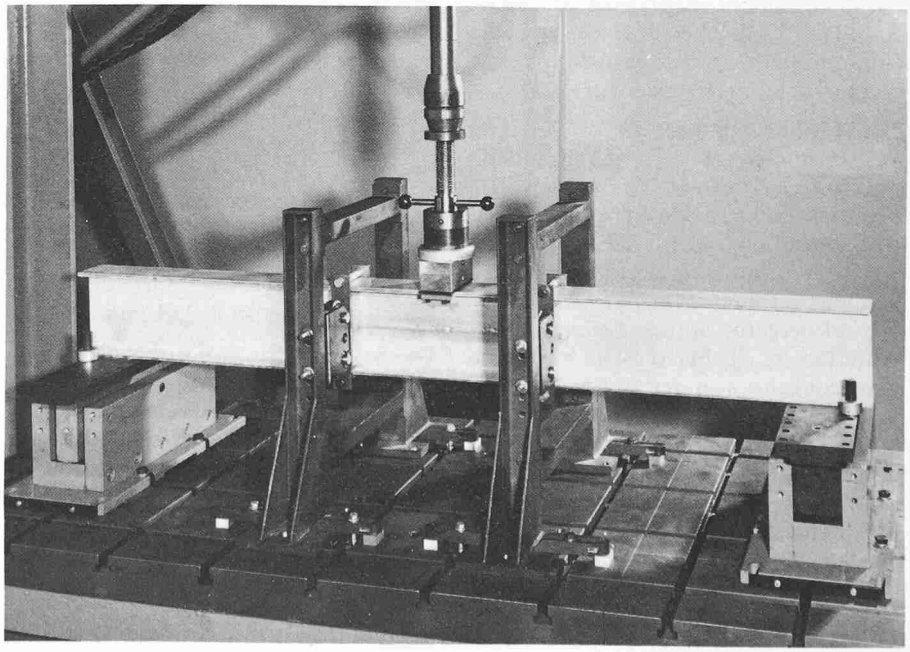


Bild 8. Ermüdungsversuche an geschweissten Aluminiumträgern

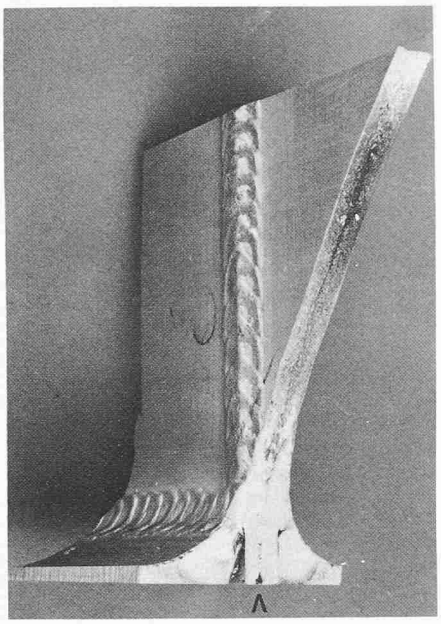


Bild 9. Strangpressprofil aus Anticorodal-112 und Peraluman-460 Stegblech, Stumpfnahtdefekt (MIG-Schweissung mit AlMg-Zusatz)

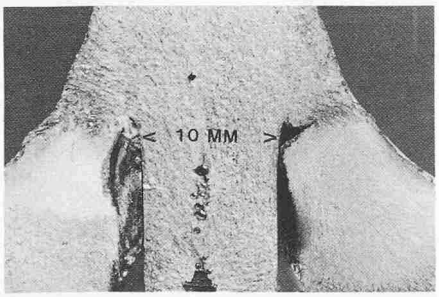


Bild 10. Detail des Defektes aus Bild 9

nach echten Rissen ähnlich, da sie häufig von einer dünnen Metallschicht umgeben sind, deren Zugfestigkeit stark reduziert ist. In dieser Hülle entstehen bereits nach wenigen Lastwechseln Ermüdungsrisse, die sich infolge der hohen lokalen Spannungen rasch ausdehnen und das Porennest zu einem elliptischen Riss mit scharfer Kante verwandeln.

Diese Gruppenwirkung wird in den Bildern 11–13 deutlich. Auf der Übersicht in Bild 11 erkennt man eine Verschiebung der halbelliptischen Ermüdungszone mit stabilem Risswachstum und ebener Dehnung nach der Schweissnaht Seite A. Auf dieser Seite befindet sich die Porengruppe, die in der Detailaufnahme (Bild 12) dargestellt ist.

Die Wirkung dieser Gruppe ist in bezug auf Rissausbreitung verheerender gewesen als die Einzelpore (Bild 13) auf der gegenüberliegenden Seite. Das kann aus der Verschiebung der erwähnten Ermüdungszone geschlossen werden. Diese Vermutung wird durch die Beobachtung der strahlenförmigen Linien bekräftigt, welche stets senkrecht zu den sich ausweitenden Rissfronten verlaufen und im gegebenen Beispiel deutlich in die Gegend der Porengruppe bei A führen (Bild 11).

Oxidhauteinschlüsse

Beim *Strangpressen* bereitet die *Beschaffenheit der Profiloberfläche* Werkingenieuren ab und zu Kopfzerbrechen. Je nach Legierungen, Pressverfahren und Pressgeschwindigkeit entsteht an der Oberfläche eine Grobkornzone. In den Bildern 14 und 15 erkennt man eine solche von etwa 1 mm Dicke, wie sie zum Beispiel in Anticorodal-062 anzutreffen ist. Die gratförmigen, fächerartigen Normallinien der Rissfronten streben auf Bild 14 und 15 nach der Grobkornzone, wo neben anderen Unregelmässigkeiten Defekte in Gestalt von Oxidhauteinschlüssen und lokaler interkristalliner Korrosion zu finden sind.

Die Detailaufnahme (Bild 15) veranschaulicht die Tatsache, dass trotz gewaltigem Unterschied in der Korngrösse zwischen Randzone und eingeschlossenem Material die Rissfronten beide Gefügestrukturen ohne wesentliche Ablenkung durchlaufen.

Oxidhauteinschlüsse treten auch in Schweissnähten als Quellen von Ermüdungsrissen auf. Bild 16 stellt die Makroaufnahme der Halsnaht einer Trägerserie in Anticorodal-112 dar. In der Vergrösserung (Bild 17) erkennt man im Bereich A eine dunkel gefärbte Zone. Dort befindet sich ein relativ kleiner Oxidhauteinschluss, der von Magnesiumrückständen russähnlich

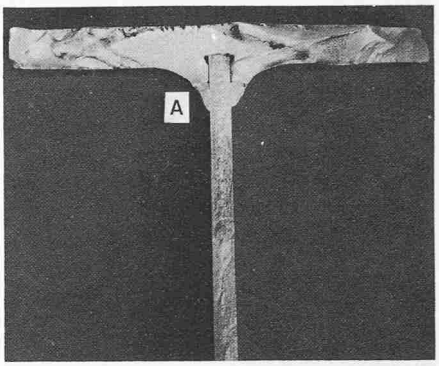


Bild 11. Ermüdungsbruch an geschweisstem Anticorodal-112-Profil mit Peraluman-460, Stegblech (MIG-Verfahren, AlMg-Zusatz). Asymetrische Bruchfläche infolge kritischer Porengruppe bei A

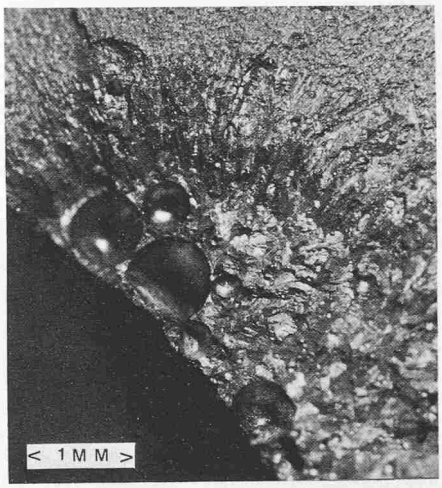


Bild 12. Makrodetail der Porengruppe bei A. Zu beachten ist die verstärkte Wirkung der Gruppe gegenüber der Einzelpore

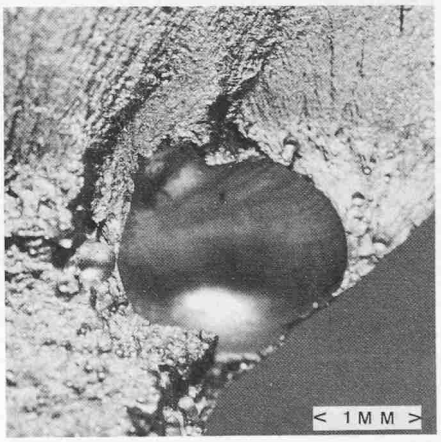


Bild 13. Makrodetail aus Bild 11. Einzelpore

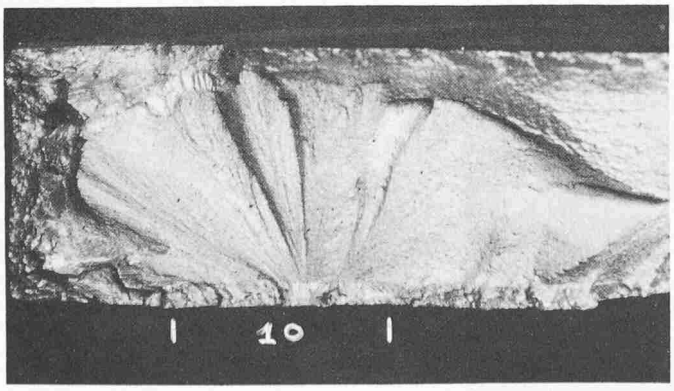


Bild 14. Oxidhauteinschlüsse in der Grobkornzone von Anticorodal-062 Strangpressprofilen als Quelle von Ermüdungsrissen

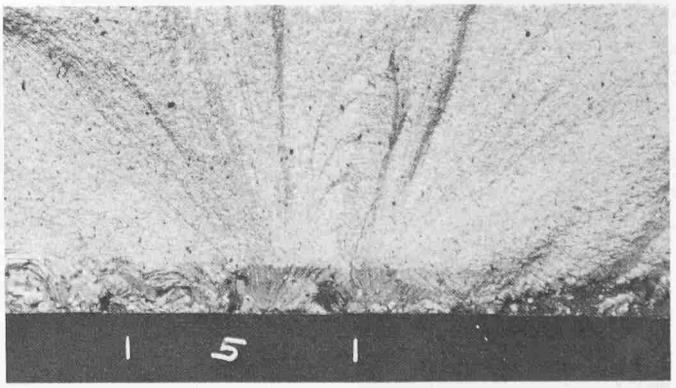


Bild 15. Makrobildausschnitt aus Bild 14. Zu beachten ist der Rissfortschritt durch die etwa 1 mm dicke Grobkornzone, der trotz gewaltiger Gefügeunterschiede praktisch ohne Ablenkung erfolgt ist

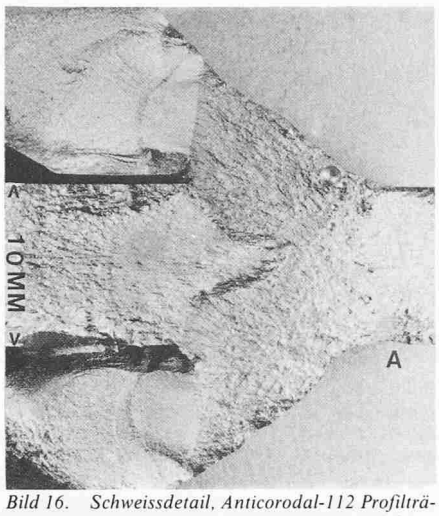


Bild 16. Schweissdetail, Anticorodal-112 Profilträger mit Peraluman-460-Blech. Oxidhauteinschluss bei A als Quelle des Ermüdungsrisses (MIG-Schweissung mit AlMg-Zusatz)

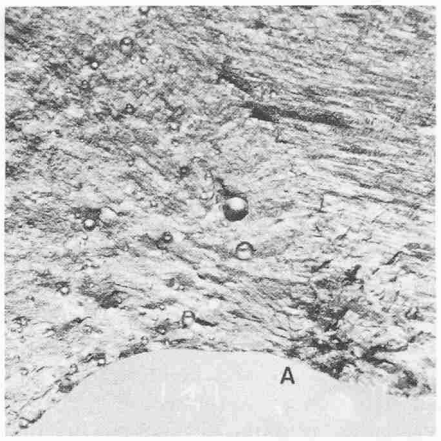


Bild 17. Makrobildausschnitt im Bereich A (Bild 16)

Bild 18. REM-Aufnahme im Bereich des Makrobildausschnittes, Bild 17. Typische, faserförmige Textur des Bruchbildes. Fasern stehen senkrecht zur Rissfront (siehe Bilder 22 und 23). Im Bereich A Oxidhauteinschluss durchzogen mit Mg-Rückständen

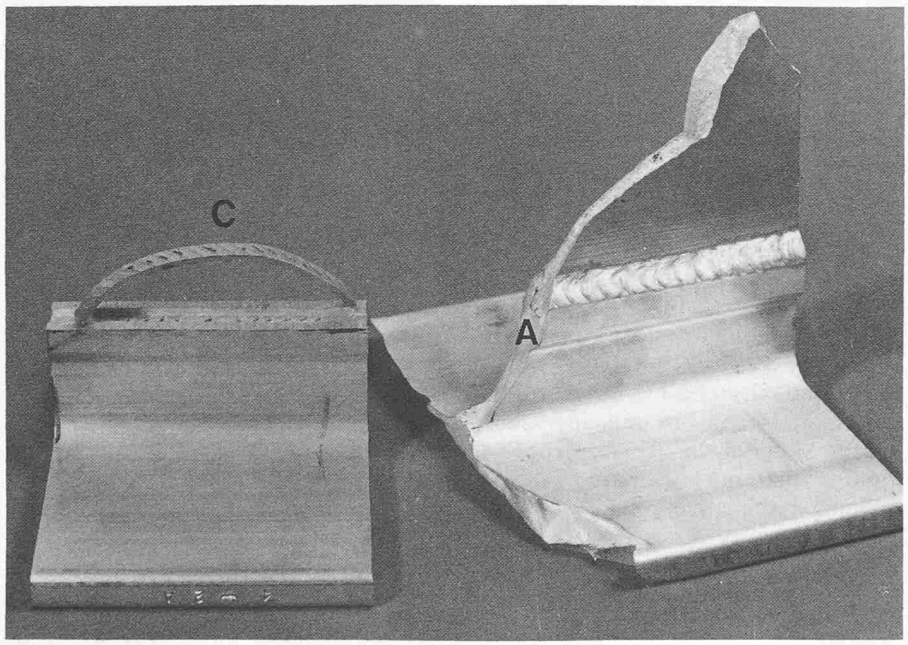


Bild 19. Prägungsdefekt. Die stark gekerbte Sägeschnittkante des Stegbleches wurde infolge Schwindspannungen in die Profilrinne eingeprägt

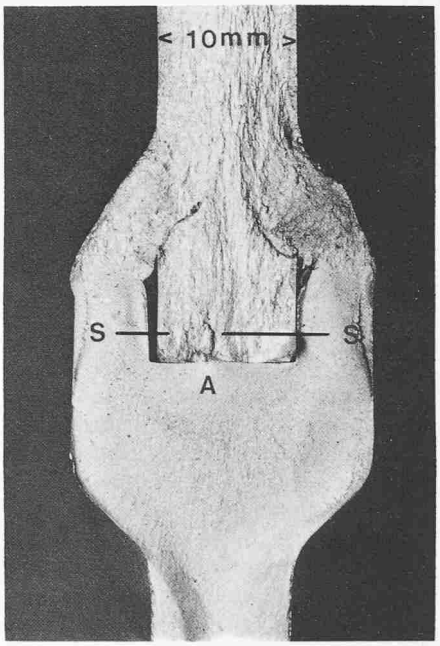


Bild 20. Ursprung des Ermüdungsrisses infolge Prägefehler. Durch Aufschneiden des Profiles auf Höhe SS kann der Stegblechstreifen C in Bild 19 freigelegt und die Prägedefekte nachgewiesen werden

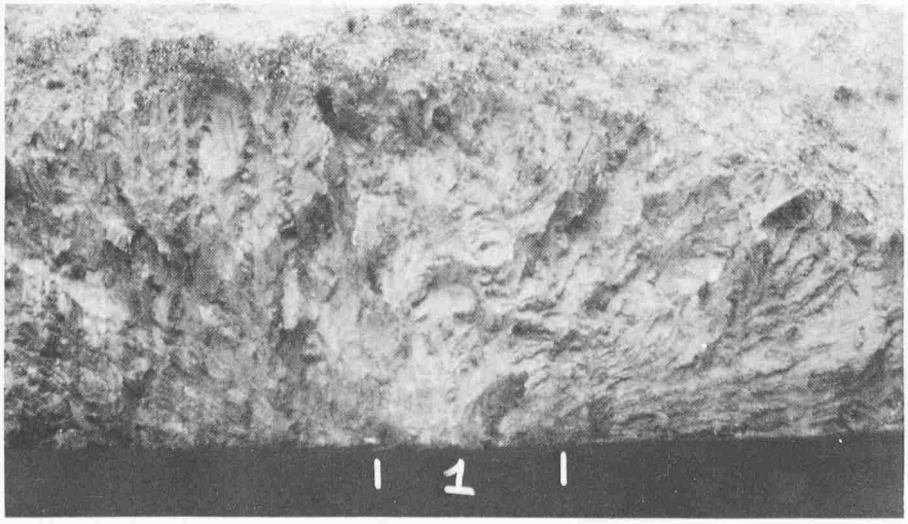


Bild 21. Sekundärriss im Stegblech, Tiefe etwa 1,9 mm

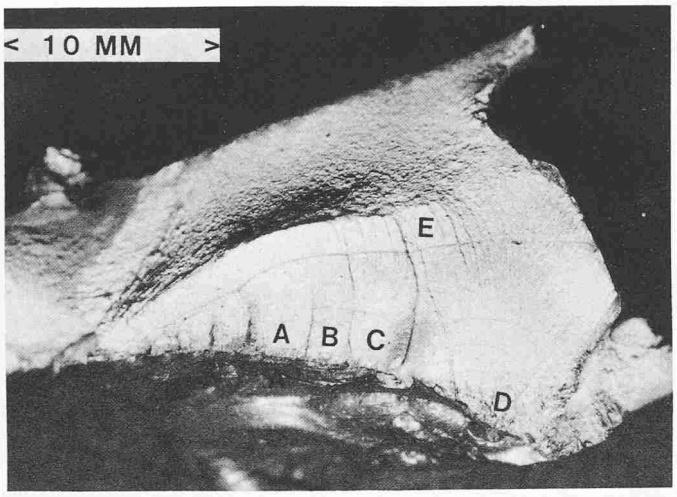


Bild 22. Abbilden von Rissfronten mittels Blocklasten. Entstehung von Einzelrissgruppen A, B, C und D mit Rissverschmelzung zu Einzelriss E

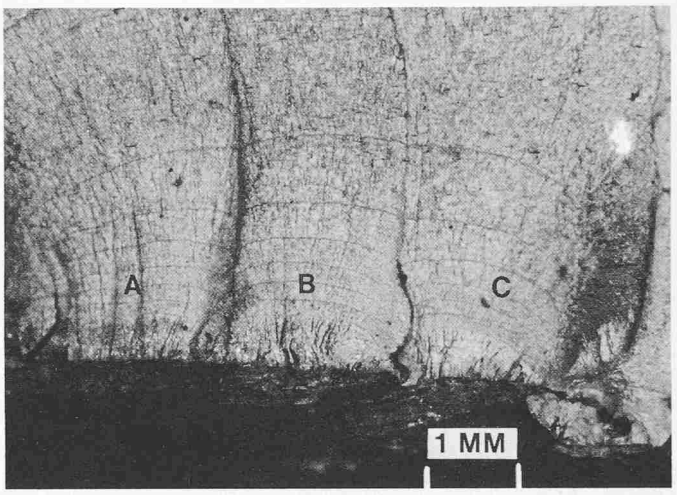


Bild 23. Detail aus Bild 22. Dünne Linien stellen den Rissfortschritt bei $\Delta\sigma$ = 70 N/mm² während 10000 Lastwechseln dar, die breiteren Bänder dazwischen eine solche bei $\Delta\sigma$ = 120 N/mm² während 5000 Lastwechseln

durchzogen ist. Die REM-Aufnahme in Bild 18 bestätigt die aus der Makrofotographie gewonnenen Erkenntnisse.

Hält man die Makroaufnahme auf Bild 17 jener der REM-Aufnahme (Bild 18) gegenüber, erkennt man auf der letzten die auffallende faserförmige Textur der Bruchfläche. Die Fasern sind die in den Makroaufnahmen ebenfalls ersichtlichen Normallinien zu den Rissfronten, Linien, die im REM-Bild mit besonderer Feinheit erscheinen. Zonen, wo diese Faserstruktur schwach richtungsmässig ungeordnet erscheint oder ganz fehlt, stellen Defektherde wie zum Beispiel Oxidhauteinschlüsse dar. Das Fehlen der Fasern bedeutet, dass an jenen Stellen der Werkstoff von keinen Rissfronten durchwandert worden ist.

Kerbwirkung infolge Bearbeitung mit Bandsäge

Eine andere Art von Defekten ist auf Bild 19 festgehalten. Bei der Herstellung des geschweissten Profilträgers hat man das Stegblech mittels einer Bandsäge mit rauhem Sägeblatt zurechtgeschnitten. Die Sägeschnitte wurden nicht weiter bearbeitet und der Träger nach dem Einfügen des Stegbleches in die Profilrinnen verschweisst. Nach dem Abkühlen der Schweissnaht haben die Schwindspannungen das Stegblech so stark in die Profilrinne gepresst, dass das Sägemuster in die Profiloberfläche eingeprägt wurde. Dies konnte durch das Aufschneiden der Schweissnaht auf der Höhe SS in Bild 20 leicht nachgewiesen werden.

Auf Bild 19 ist im Detail C der freigelegte Stegblechstreifen abgebildet, nachdem er zuvor entfernt, umgedreht und zur Sichtbarmachung allfälliger Ermüdungsrisse aufgebogen worden war. Unter diesem Stegblechstreifen ist die Prägung im Profil deutlich erkennbar. Die Einprägung der scharfkantigen Sägekerben hat zum Ermüdungsriss im Profil geführt (Bild 20). Mit dem Eindringen von Ermüdungsrissen aus Sägekerben ins Profilinnere sind gleichzeitig mehrere Risse ins Stegblech vorgestossen. Die Makroaufnahme in Bild 21 hält einen derartigen Riss von 1,9 mm Tiefe fest.

Nach der Entdeckung dieser Defektart, die eigentlich als Fabrikationsfehler zu betrachten ist, hat man eine weitere Serie von Trägern gefertigt und geprüft. Anstelle des Bandsägeschnittes hat man bei dieser Serie die Stegbleche mit einem *Plasmabrenner* zugeschnitten. Auf diese Weise wurden die erwähnten Defekte beseitigt. Die Lastspielzahlen dieser Versuchsreihe lagen mehr als das Doppelte über jenen mit den Prägefehlern.

Abbildung von Rissfronten auf Ermüdungsbruchflächen zur Erforschung der Vorgänge im Frühstadium der Rissausbreitung

Besondere Laststeuerung, wie zum Beispiel das Fahren von Probekörpern mit sogenannten Blocklasten, ermöglicht es, Rissfronten auf Ermüdungsflächen abzubilden. Die Bilder 22 und 23 zeigen Ausschnitte aus der Ermüdungsbruchfläche eines geschweissten Anticorodal-112 Profilträgers. Die feinen, jahrringähnlichen Linien stellen den Rissfortschritt bei einer Spannungsdifferenz von 70 MPA während 10000 Lastwechseln dar. Die helleren, breiten Bänder dazwischen entsprechen einem Rissfortschritt bei einer Spannungsdifferenz von 120 MPA während 5000 Lastwechseln. Das progressive Risswachstum mit zunehmender Risslänge ist an der rasch anwachsenden Bandbreite leicht zu erkennen. Auf Bild 23 bemerkt man das im Frühstadium der Rissausbreitung häufig anzutreffende Phänomen der Bildung von Einzelrissgruppen, A, B, C, D, die sich mit fortschreitender Rissausbreitung zu einem Gesamtriss, E, vereinen. Dieser Vorgang von Rissverschmelzung stellt ein besonderes, entsprechend kompliziertes Problem der numerischen Bruchmechanik dar.

Bild 24 dient als Überblick über die *Rissverschmelzungsvorgänge* des in Bild 21 festgehaltenen Ermüdungsrisses. Betrachtet man den unteren Rand des Risses genauer, erkennt man eine Reihe von halbelliptischen Einzelrissen, deren kleinere Halbachsen ungefähr 0,2 bis 0,25 mm messen. Da die Abstände zwischen den Rissen relativ klein sind, verschmelzen sie bereits nach wenigen Lastwechseln zu einem sehr flachen halbelliptischen Riss, der sich schliesslich zum deutlich erkennbaren Endriss von 1,9 mm Tiefe ausweitet. Auf Bild 25 ist die Entstehung eines dieser Einzelrisse angedeutet. Sie beruht ebenfalls auf einer Verschmelzung jener Risse, die einerseits aus den beiden Oberflächendefekten, O, und andererseits dem Walzeinschluss, W, hervorgegangen sind.

Überprüft man ferner den Bereich der Spannungsintensität dieses Einzelrisses von der Risstiefe von 0,25 Millimetern, erhält man den Wert von 1,3 MPA $\sqrt{M}$. Dies entspricht dem Spannungsintensitätsbereich im Übergang von Stadium I zu Stadium II der Rissausbreitung. Man bemerkt auch die mit diesem Übergang im Zusammenhang stehende Vergröberung der faserförmigen Textur der Bruchfläche.

Aufgrund der vorgeführten Beispiele erkennt man den Nutzen fraktographischer Auswertungen. Die Fraktographie selbst, insbesondere der Bereich der Elektronenmikroskopie, wurde nur am Rande berührt. Zur Beurteilung des Ermüdungsverhaltens hochbeanspruchter, mit aller Vorsicht konstruiert und gefertigter, nicht geschweisster Maschinenelemente, sind entsprechend

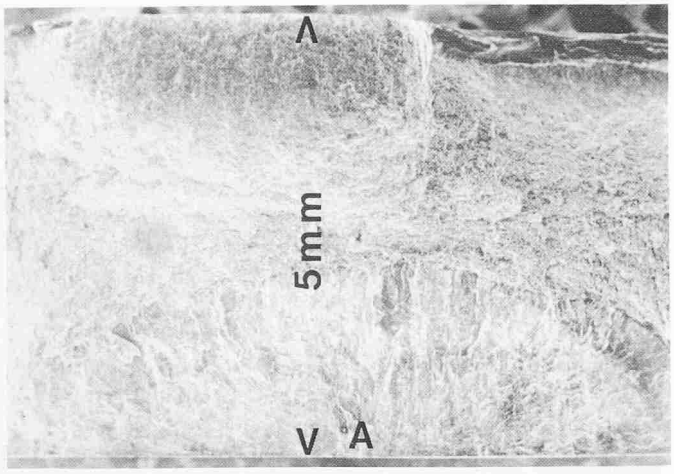


Bild 24. REM-Aufnahme des Makrobildes 21. Der Einzelriss von 1,9 mm Tiefe ist entstanden aus der Rissverschmelzung von Einzelgruppen. Diese sind in dunklen Streifen am unteren Rand des halbelliptischen Risses sichtbar. Länge des Streifens etwa 3 mm, Breite etwa 0,2–0,25 mm

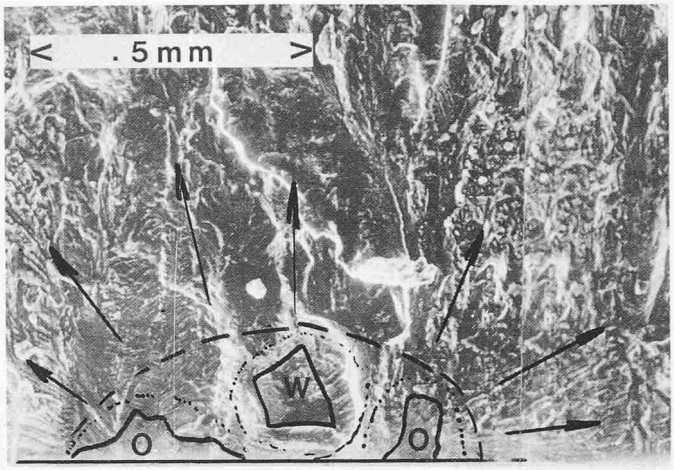


Bild 25. Detailaufnahme REM-Bild von der Entstehung einer Einzelgruppe aus den Oberflächenfehlern O (Prägedefekte) und dem Walzeneinschluss W

umfangreichere fraktographische Analysen notwendig.

Ausblick

Die Defektanalyse gehört neben den Methoden zur Ermittlung von Rissausbreitungsraten und den Modellen der Bruchmechanik zu den unentbehrlichen Werkzeugen der Ermüdungsforschung. Der Erfolg bei der Lösung von Ermüdungsproblemen hängt von der Geschicklichkeit ab, mit der dieses Werkzeug gehandhabt wird. Ein wesentlicher Vorteil der bruchmechanischen Prüf- und Berechnungsverfahren besteht in der klaren Trennung zwischen den Einflüssen der Belastung, jenen der Defekte, und jenen reiner Materialkennwerte. Die Schattenseite dieser Verfahren liegt bei den hohen Anforderungen an die Materialprüfung und die analytischen Auswertungen.

Adresse des Verfassers: *Dr. R. Jaccard*, c/o Alusuisse AG, Abteilung AHAT-Stab, Buckhauserstr. 11, 8048 Zürich

Literatur

[1] DEL RESEARCH Compliance-Verfahren der PSC Professional Services Group Inc. Hellertown, Pa 18055, USA
A. Saxena, S.J. Hudak, Jr., J.K. Donald, D.W. Schmidt: «Computer Controlled K-Decreasing Test Technique for Low Rate Fatigue Crack Growth Testing». J. Testing and Evaluation JETVA, Vol. 6, May 1978
Donald, J.K. and *Schmidt, D.W.:* «Computer Controlled Stress Intensity Gradient Technique for High Rate Fatigue Crack Growth Testing». Journal of Testing and Evaluation, JETVA, Vol. 8, No 1, January 1980. pp. 19–24
A. Saxena, S.J. Hudak, Jr.: «Review and Extension of Compliance Information for Common Crack Growth Specimens»
W.G. Clark, Jr. and *S.J. Hudak, Jr.:* «Variability in Fatigue Crack Growth Rate Testing». J. Testing and Evaluation, Vol. 3, No. 6, 1975. pp. 454–465

[2] ALUSUISSE REFAN-Verfahren, *J. Leupp:* «Rissfortschrittsmessungen auf Hochfrequenzpulsatoren». SAR 1/1980, Seite 24–27

[3] Oberflächenmessung mittels Lichtmikroskop Standard Methode

[4] PLOTXY Alusuisse Computer-Programm auf VAX 11/780 installiert. Zur Auswertung von Rissfortschrittsmessungen. (Auswertungen nach DEL RESEARCH, ASTM COMITEE E24, 78 Recommended Data Reduction Techniques und werkseigene Verfahren)

[5] *P.C. Paris* und *G.C. Sih:* «Stress Analysis of Cracks». ASTM STP 381, 1970, Seite 31

[6] *R. Jaccard:* «Die Tauglichkeit der Makrofotographie zur Vermessung von Defekten und Rissfronten in Ermüdungsbruchflächen metallischer Werkstoffe». Alusuisse-Bericht Nr. 23480

[7] FAGRO Alusuisse Computer-Programm auf VAX 11/780. Zur Berechnung von Rissfronten, Ermittlung von anfänglichen Rissgrössen oder Endrissgrössen mit Direktzugriff auf Datenbank der Ermüdungsmodelle, geordnet nach R-Werten, Legierungstyp, usw.

[8] Stress Analysis and Growth of Cracks ASTM STP 513, 1971

[9] Fatigue Crack Growth, ASTM STP 595, 1976

[10] Flaw Growth and Fracture, ASTM STP 631, 1977

[11] Fatigue Crack Growth, ASTM STP 637, 1977

[12] Fractography and Atlas of Fractographs, Metal Handbook ASM, Vol. 9, 1974

[13] Failure Analysis and Preventation, Handbook of Metals ASM, Vol. 10, 1975

[14] AFFDL-TR-69-III Technical Report, Airforce Flight Dynamics Laboratory, Airforce Base, Ohio, page 42