

Sensoren zur Messung von Rißfortschritt und Rißgeschwindigkeit

Holger Neumann

Im Beitrag wird ein neuentwickelter Sensor zur Rißfortschrittmessung auf der Basis der indirekten Potentialmethode vorgestellt. Erste Versuchsergebnisse bei der Ermüdungsrißkontrolle sowie Rißgeschwindigkeitsmessungen bei instabiler Rißausbreitung an Stahl werden dargestellt. Möglichkeiten und Grenzen derartiger Sensoren werden analysiert und mit anderen Meßmethoden verglichen.

This paper reports on a newly developed crack gage for measuring crack length on the basis of an indirect potential DC measurement technique. First results are represented of the application to fatigue crack growth control and to measurement of crack tip velocity of rapid crack propagation on steel specimens. Applications and restrictions of such gages are shown and compared with other measuring methods.

1. Einleitung

Eine wichtige meßtechnische Aufgabe bei der bruchmechanischen Prüfung von Werkstoffen ist die Ermittlung der Rißlänge a . Die Anforderungen an ein Meßverfahren können dabei bezüglich der Auflösung, der geforderten Meßlänge und der Art der Registrierung sehr unterschiedlich sein. Eine Übersicht der angewendeten Meßtechniken wurde bereits in [1] gegeben.

Eine mit relativ geringem Aufwand realisierbare meßtechnische Möglichkeit ist die indirekte Potentialmethode. Dabei werden auf die Probenoberfläche elektrisch leitende Widerstandsmaterialien aufgebracht, die gegenüber der Probe isoliert sind und bei Fortschreiten des Risses aufgetrennt werden. Die Widerstandsänderung dient somit als Maß für den Rißfortschritt. Zur technischen Realisierung dieses Verfahrens wurden Rißsensoren entwickelt, die auf die Probe aufgeklebt werden und den Rißfortschritt dedektieren.

2. Sensorarten auf der Basis der indirekten Potentialmethode

Derartige Sensoren haben prinzipiell den gleichen Aufbau wie ein Foliendehnmessstreifen und werden auch nach einer ähnlichen Technologie hergestellt. Sie bestehen aus einem ca. 30 – 40 μm dicken isolierendem Trägermaterial mit einer 2 – 5 μm dicken Folie aus Widerstandsmaterial, das entweder unstrukturiert [2] oder strukturiert [3] ist und entsprechend ein analoges bzw. treppenförmig ansteigendes Signal abgibt. Die Widerstandsänderung ist bei strukturierten Sensoren größer, das Signal unabhängiger von Störspannungen, leichter interpretierbar, und die Auflösung ist bei kleinen Meßlängen relativ hoch (bis zu 0,25 mm).

Bisher angebotene Sensoren stellen eine Parallelschaltung von Einzelwiderständen dar. Das wirkte sich negativ aus, da die Widerstandsänderung exponentiell ansteigt und damit die ersten Widerstandsänderungen sehr klein und schwer auflösbar bzw. größere Meßlängen mit hoher Auflösung nicht mehr realisierbar sind. So erreicht der von [3] angebotene Streifensensor für 40 mm Meßlänge nur noch eine Auflösung von 2 mm. Hinzu kommt der Nachteil,

daß zur Erzeugung von gleichen Widerstandsänderungen die Streifenbreite variiert werden muß.

Diese Nachteile führten zur Entwicklung eines neuen, patentierten Sensortyps, der im wesentlichen eine Reihenschaltung darstellt und bei dem die erwähnten Nachteile nicht auftreten (Bild 1). Bei Rißfortschritt werden Streifen getrennt, die nacheinander Widerstände „zuschalten“, so daß ein linear ansteigendes treppenförmiges Signal entsteht. Die Vorteile dieses Prinzips sind, daß bei gleichbleibend hoher Auflösung große Meßlängen realisierbar sind. Die Sensorkonstruktion kann an die Meßaufgabe individuell angepaßt werden. Bisher wurden Sensoren für Ermüdungsrißeinbringung und Sensoren für mittlere und große Meßlängen entwickelt (Bild 2). Um die technologischen Grenzen der mit der z.Z. verfügbaren Technik herstellbaren Sensoren zu ermitteln, wurden bereits Sensoren mit einer Streifenbreite von 20 μm und einem Streifenabstand von 80 μm als Prototypen hergestellt. Werden dünnere Widerstandsfolien eingesetzt, sind Streifenbreiten von 5 μm denkbar.

Der Schaltungsaufbau erfolgt entsprechend Bild 3a. Durch den einerseits positiv zu bewertenden großen Widerstandshub ergibt sich jedoch für die Messung instabiler

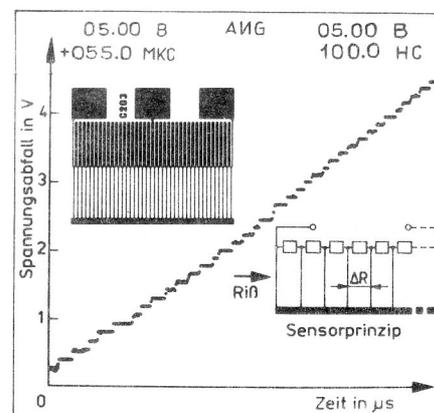
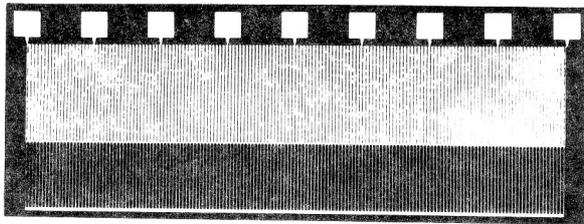


Bild 1
Dewitron-Sensor mit Prinzipschaltbild und experimentell ermitteltem Rißausbreitungssignal bei instabiler Rißausbreitung in PMMA



Sensoren der Dewitron GmbH Teltow

Widerstandsfolie : Konstantan, 5 μm , TKR 8ppm/K
 Trägermaterial : epoxyharzverstärktes Papier ca. 30 μm

Typ	Meßlänge in mm	Streifenzahl	Streifenbreite in μm	Streifenabstand in μm
a) C 202	56	160	98	350
b) C 203	14	40	50	350
c) C 204	6	12	80	500

Bild 2
Dewitron-Sensoren, Ausführungsbeispiele

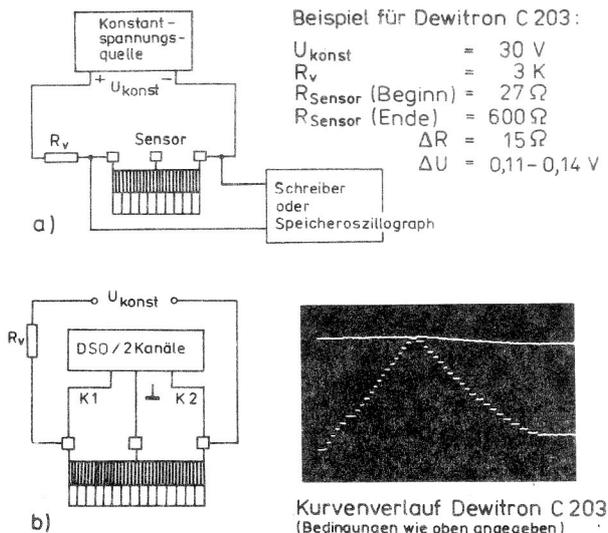


Bild 3
Beispiele zur Verschaltung von Dewitron-Sensoren

Rißausbreitung und großer Rißlängen der Nachteil eines hohen Gesamtwiderstandes und damit einer großen Zeitkonstante. Das Problem wird umso größer, je filigraner die Sensorstreifen zur Erhöhung der Auflösung ausgelegt werden. Hinzu kommt das bei der Verwendung von digitaler Auswertetechnik auftretende Problem der Auflösung des Meßgerätes. So z.B. ist das Sensorsignal des Dewitron C202 mit 190 Streifen mit einkanaliger 8-bit-Technik nicht mehr eindeutig aufnehmbar.

Beide Probleme werden gelöst, indem man das Signal an mehreren Punkten des Sensors mit mehrkanaligen, zeitlich synchronisierten Meßgeräten abtastet (Bild 3b).

3. Besonderheiten der Rißfortschrittsmessung bei instabiler Rißausbreitung

Neben dem Einsatz der Sensoren zur Rißlängenmessung bei stabiler Rißausbreitung ist das Verhalten beim Auftreten instabiler Risse von großem Interesse. Instabil sich ausbreitende Risse erreichen materialabhängig Geschwindigkeiten bis zu 1300 m/s. Versuchsergebnisse beim Einsatz der Sensoren unter diesen Bedingungen sind bisher nicht bekannt [4]. Für diesen Anwendungsfall ergeben sich folgende Fragenkomplexe bzw. Anforderungen:

a) Der aufgeklebte Sensor stellt, ähnlich wie ein Dehnmessstreifen, eine Verbundkonstruktion dar. Für die Forderung, daß die Streifen zeitgleich mit dem Rißverlauf an der Oberfläche reißen sollen, müssen folgende Bedingungen eingehalten werden:

- Die Werkstoffe müssen vor und während des Versuches fest miteinander verbunden sein. Fehler beim Aufkleben der Sensoren lassen sich durch warmaushärtbare Klebstoffe vermeiden. Die Streifen müssen fest auf dem Träger haften. Vor dem Streifenriß findet eine, wenn auch geringe, elastisch-plastische Dehnung des Streifens statt. Die bei konstant angenommener Bruchdehnung auftretende Verlängerung und damit die Zeitverzögerung bis Signalabgabe des Streifens ist umso größer, je größer seine absolute freie Länge ist. Diese absolute freie Länge geht bei fester Haftung auf dem Träger gegen Null; löst sich der Streifen vom Träger, wird die mögliche Verlängerung und damit die Zeitverzögerung größer.
- Die elastisch-plastische Dehnung des Metallfolienmaterials muß möglichst klein sein. Der Streifen muß ohne sichtbare Einschnürung reißen.
- Der Rißverlauf der Probe und des Sensors als Verbundkonstruktion müssen auch bei instabiler Rißausbreitung gleich sein. Es dürfen weder ein zu frühes Reißen durch das dem Riß vorausseilende Verformungsfeld noch ein verzögertes Reißen auf Grund zu hoher Zähigkeit der Sensorkonstruktion auftreten.

b) Der aufgeklebte Sensor kann durch seine Anwesenheit den Spannungszustand an der Oberfläche beeinflussen, bzw. durch die Art der Applikation kann eine Strukturveränderung der Oberfläche erfolgen. Letzteres ist z.B. bei lösungsmittelhaltigen Werkstoffen und Plastwerkstoffen möglich. Damit kann die Bruchcharakteristik bei sensitiven Materialien verändert werden [1].

c) Ein während der instabilen Rißausbreitung mögliches Schließen der Rißufer muß sicher dedektierbar sein, um Fehlinterpretationen auszuschließen.

Diese Probleme sind nicht nur bei Messungen mit den Sensoren zu beachten, sondern treten auch modifiziert bei der Aufbringung von leitfähigen Schichten oder Streifen durch Bedampfen oder Aufstreichen auf Metallproben auf. Hier ist es vor allem die Auswahl und Applikation der Isolationsschicht auf die leitende Metallprobe, für die ähnliches gilt wie für die Trägerschicht des Sensors.

4. Versuchsergebnisse

Die neuentwickelten Sensoren wurden zunächst unter den Bedingungen stabiler Rißausbreitung bei der Herstellung von Ermüdungsanrissen in Metallproben untersucht. Die Versuche an Stahlproben in einer Dreipunktbiegeanordnung ergaben, daß der Rißfortschritt entsprechend der Sensorauflösung dedektiert wird. Bild 4 zeigt einen aufgenommenen Kurvenverlauf, der jedoch von der erwarteten exakten Treppenfunktion abweicht. Ursache ist die schwingende Beanspruchung, die auch nach dem Streifenriß beim Erreichen der Oberlast eine Rischlieung und damit eine Rekontaktierung bereits gerissener Streifen mit einem undefinierten Übergangswiderstand bewirkt. Die exakte Rißlänge kann jedoch durch kurzzeitige Reduzierung der Wechsellast genau ermittelt werden. Da jedoch bei den meisten Anwendungsfällen eine so hochgenaue Anzeige nicht notwendig ist, kann aus dem erreichten Spannungswert mit genügender Sicherheit auf die erreichte Rißlänge geschlossen werden. Als sehr vorteilhaft erwies sich dabei das neue Prinzip des Sensors, da durch die realisierte stufenweise Reihenschaltung von Widerständen Spannungsabfälle im Voltbereich registriert werden, die von Strspannungspegeln nicht beeinflusst werden und direkt zur Maschinensteuerung nutzbar sind. Andere Sensortypen liefern als direktes Ausgangssignal nur Werte im Millivoltbereich.

Von besonderem Interesse war das Verhalten der Sensoren bei instabiler Rißausbreitung. Zunächst wurde als Modellmaterial PMMA eingesetzt, da dieses Material bereits bei Raumtemperatur instabiles Riausbreitungsverhalten aufweist. Die Ergebnisse, ausführlich in [1] dargelegt, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Der Sensor veränderte bei instabiler Rißausbreitung in PMMA die Bruchcharakteristik des Materials an der Ober-

flche bis ca. 1 mm Tiefe. Es traten in diesem Bereich partielle Ausbrüche auf, die über dem Querschnitt rastlinienhnlich ausliefen. Hauptursache ist das Trägermaterial des Sensors, das offensichtlich eine Veränderung des sich an der Oberfläche einstellenden Spannungszustandes bewirkte. Damit ergab sich, daß die Sensoren zur Aufnahme von Rigeschwindigkeitsverlufen bei derartig sensitiven Materialien nur bedingt geeignet sind.

Daher wurde für PMMA-Proben eine kombinierte Meßmethode entwickelt, die die Vorteile des Sensors als Widerstandsnetzwerk mit den Vorteilen der Bedampfungstechnik verbindet. Dazu wurde der Verbindungssteg der Streifen des Sensors abgeschnitten, der Sensor auf die Probe appliziert und Silberstreifen mit einer Spezialschablone so aufgedampft, daß sie quer zum erwarteten Rißverlauf lagen und mit den Sensorstreifen kontaktierten. Das Prinzip zeigt Bild 5 für eine Probe aus PMMA. Nach dem Bedampfen und der Prüfung auf Leitfähigkeit wurden die aufgedampften Streifen durch Lackleitsilber oder einen zweiten Bedampfungsvorgang kurzgeschlossen. Damit entstand jetzt wieder der ursprüngliche Sensor, der nun den Vorteil aufwies, daß die Bruchcharakteristik nicht verändert wurde und daß über dem Rißverlauf nur die sehr dünnen und trägheitslos reagierenden Silberstreifen lagen. Mit dieser kombinierten Methode wurden für PMMA Rißgeschwindigkeitsverläufe aufgenommen, wie sie mit anderen, wesentlich aufwendigeren Meßmethoden selbst ermittelt wurden bzw. aus der Literatur bekannt sind. Mit dieser kombinierten Meßmethode aus Sensor und aufgedampften Silberstreifen lassen sich auch Messungen an Proben mit Seitenkerben durchführen, wie Bild 5 zeigt. Dazu sind jedoch räumlich gestaltete, der Kontur des Seitenkerbes folgende Spezialschablonen notwendig [1].

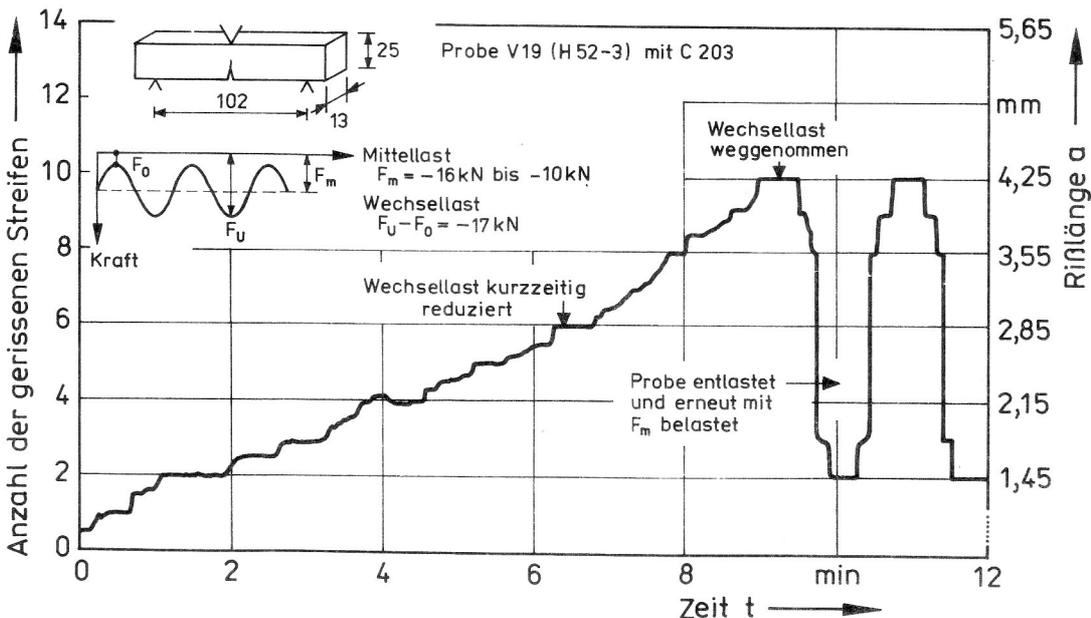


Bild 4
 Aufzeichnung des Rifortschritts bei schwingender Beanspruchung einer Stahlprobe

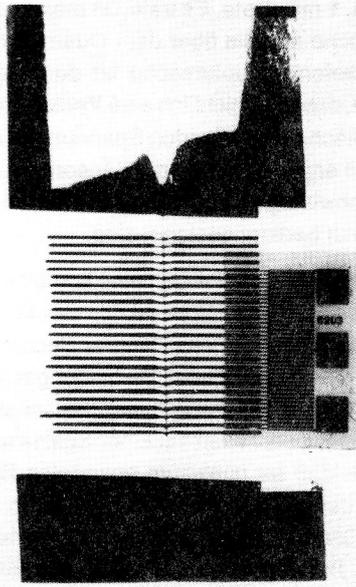


Bild 5
CT-PMMA-Probe mit Seitenkerben, Kombination von Dewitron-Sensor und Silberstreifen

Von besonderem Interesse war die Eignung der Sensoren zur Aufnahme der Rißgeschwindigkeit an Stahlproben. Dazu wurden CT-Proben aus dem Vergütungsstahl 50CrV4 hergestellt (Abmessungen: $W = 80$ mm, $B = 24$ mm), gehärtet und ein Anriß mit einem Radius $\rho = 160 \mu\text{m}$ durch Erodieren eingebracht. Die Proben wurden mit flüssigem Stickstoff auf -50°C gekühlt, um instabile Rißausbreitung zu garantieren. Auf eine Seite der Probe wurde der Sensor, auf die andere Seite das kombinierte Meßsystem, bestehend aus Sensor und aufgedampften Silberstreifen, appliziert. Das kombinierte Meßsystem, das sich bei den PMMA-Proben bereits bewährt hatte, diente gewissermaßen zur Referenzmessung und damit zur Beurteilung der Qualität der Meßergebnisse des Sensors. Die Probenpräparation war äußerst aufwendig und erforderte einige Voruntersuchungen. Besonders kompliziert war die Aufbringung des kombinierten Meßsystems, da bei Metallproben im Gegensatz zum nicht leitenden PMMA eine Isolationsschicht notwendig ist. Vorversuche mit dem für die Aufklebung des Sensors verwendeten, heißhärtenden Klebstoff Rydapox (Leuna-Werke) verliefen negativ, da bei den durch Aufstreichen aufgetragenen Klebstoffschichten, die ca. $20 - 30 \mu\text{m}$ dick waren, ein Abplatzen der Schicht in einem Bereich von $0,5$ mm beiderseits des sich ausbreitenden Risses auftrat. Zu dünn aufgetragene Schichten wiesen jedoch einen zu geringen Isolationswiderstand auf, so daß zwischen aufgedampften Streifen und Probe Nebenschlüsse auftraten. Gute Ergebnisse wurden mit dem bereits von Löbner [5] verwendeten heißhärtenden Klebstoff Epilox R50 - 70 (Leuna-Werke) erzielt. Dieser pulverförmig vorliegende Klebstoff wurde in Aceton gelöst und in zwei Arbeitsschritten mit jeweiliger Aushärtung bei 180°C dünn aufgetragen. Das Kurzschließen der aufgedampften Streifen mußte durch einen zweiten Bedampfungsvorgang erfolgen, da das im Leitsilber enthaltene Lösungsmittel die Isolationsschicht angriff und wiederum zu elektrischem Kontaktschluß mit der Probe führte.

Der Sensor wurde mit Rydapox auf die geschliffene und sorgfältig entfettete Probe geklebt, heiß unter Druck gehärtet und angeschlossen.

Die Versuchsergebnisse für 2 CT-Proben zeigt Bild 6. Auffällig sind zunächst die ausgeprägten Oszillationen der Rißgeschwindigkeitsverläufe. Die Geschwindigkeitsverläufe stimmen jedoch sehr gut mit Ergebnissen von Löbner [5] überein, der mit einer Potentialmethode ebenfalls an gehärteten CK45-CT-Proben Messungen oszillierende Rißgeschwindigkeitsverläufe aufnahm.

Im Gegensatz dazu stehen Messungen von Kalthoff [6], der bei Rißstoppuntersuchungen bei einem hochfesten Stahl eine konstante Rißgeschwindigkeit mit Hilfe der schattenoptischen Kaustikmethode ermittelte. Allerdings wird im Textteil diese Aussage relativiert, indem angegeben wird, daß bei Stahlproben verstärkt ein Stop- und Go-Verhalten beobachtet wurde, das in den im Artikel enthaltenen Abbildungen nicht wiedergegeben wird. Weiterhin waren die Abmessungen der von Kalthoff verwendeten RDCB-Proben im Verhältnis zu den hier verwendeten CT-Proben um ca. den Faktor 3 größer und wurden über einen Längskeil belastet. Damit werden dynamische Effekte (Abstrahlung von Wellenfeldern durch den bewegten Riß, Reflexion an der endlichen Probengeometrie und erneute Wechselwirkung) bei Kalthoff einen wesentlich geringeren Einfluß haben als bei den verwendeten CT-Proben.

Die Durchschnittsgeschwindigkeit der Risse wurde mit 180 bis 274 m/s ermittelt und ist damit für Stahlproben relativ klein. Erklärbar ist sie durch die außerordentliche Sprödigkeit und den verhältnismäßig kleinen Kerbradius der Rißspitze. Die Maximalkraft war relativ klein (13 bzw. 27 kN) und damit auch die gespeicherte Energie, die zur Rißausbreitung zur Verfügung stand. Die ermittelte Rißgeschwindigkeit und ihr Verlauf sollen hier jedoch nicht weiter diskutiert werden, da es bei den durchgeführten Versuchen primär um den Meßmethodenvergleich der Geschwindigkeitsmeßverfahren ging.

Wie aus Bild 6 ersichtlich ist, sind die aufgenommenen Geschwindigkeitsverläufe für beide Meßverfahren prinzipiell gleich. Das trifft sowohl für die absolute Größe der Rißgeschwindigkeit als auch für ihren Verlauf zu. Auch bei der Frequenz der festgestellten Oszillationen ergibt sich eine gute Übereinstimmung. Die weitgehende örtliche Gleichheit der Maxima und Minima ist allerdings offensichtlich zufällig, da man nicht davon ausgehen kann, daß der Riß zum gleichen Zeitpunkt an beiden Seiten der Probe startet. Da beide Digitalspeicheroszillographen intern getriggert wurden, ist auch keine zeitliche Zuordnung der für beide Seiten gemessenen Rißgeschwindigkeitsverläufe möglich. Trotzdem erlauben die vorliegenden ersten Meßergebnisse eine der Tendenz nach positive Wertung des neuentwickelten Sensors. Eingeschränkt werden muß das allerdings auf den vorliegenden Temperaturbereich. Unklar ist ebenfalls noch, welche Zeitdifferenz zwischen dem Materialriß und dem Streifenriß liegt. Dabei spielt die mögliche elastisch-plastische Dehnung des Träger- und Streifenmaterials eine wesentliche Rolle, über die bisher noch keine quantitativen Aussagen vorliegen. Die in [1] getroffene Feststellung, daß an der Rißfront keine lichtmikroskopisch feststellbaren Verlängerungen bzw. Einschnürun-

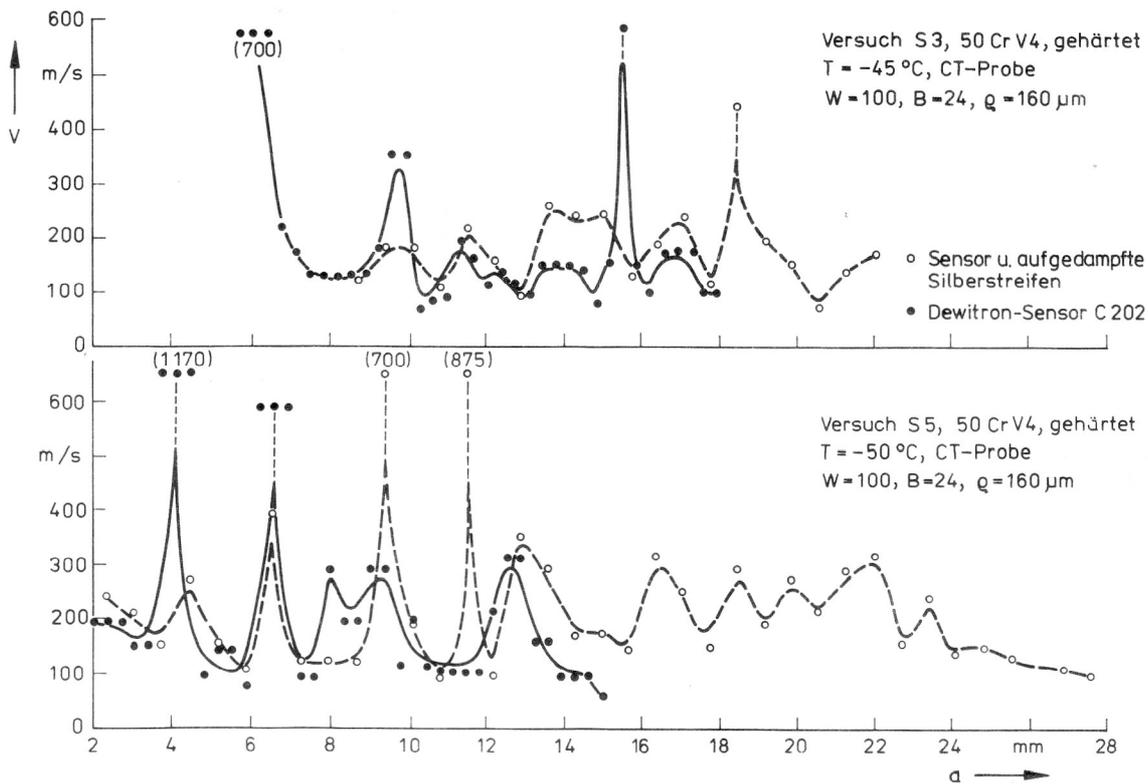


Bild 6
 Rißgeschwindigkeitsverläufe in Stahlproben, Dewitron-Sensor im Vergleich mit kombinierter Meßmethode aus Sensor und Silberstreifen

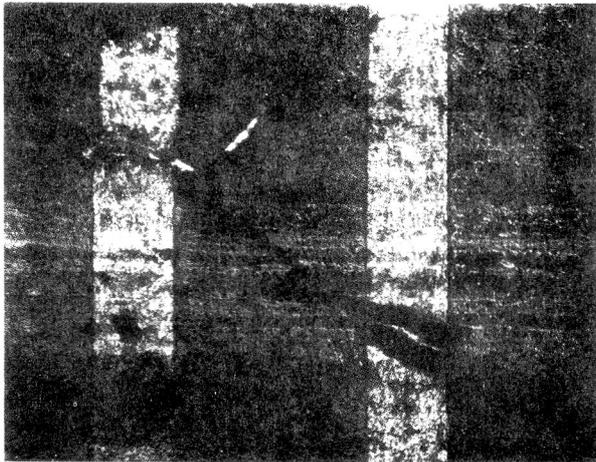


Bild 7
 Ausschnitt einer Stahlprobe mit Sensor und Rißverzweigung

gen sichtbar waren, kann in vollem Umfang nicht aufrechterhalten werden. Bild 7 zeigt eine Aufnahme der Probenoberfläche, wo bei einem der Versuche eine Rißverzweigung auftrat. Deutlich erkennbar ist, daß die Rißaufweitung bei dem links im Bild liegenden Streifen groß genug war, um einen Streifenriß hervorzurufen. Dagegen ist der rechte Streifen plastisch verformt und durch die Rißschließung bei Entlastung angehoben. Daraus ist zu schließen daß der Sensor zeitlich verzögert den Rißfortschritt dedektiert.

5. Schlußfolgerungen

Der neuentwickelte Sensor stellt von seinem neuen Wirkprinzip eine Verbesserung bisher angebotener Streifensensoren zur Rißfortschrittsmessung dar. Durch die Reihenschaltung von Widerständen wird eine höhere Auflösung auch für größere Meßlängen möglich.

Jedoch existiert bei diesen Schichtsystemen, die den Rißfortschritt an der Oberfläche erfassen, generell das Problem der zeitlichen und örtlichen Übereinstimmung von Probenriß und Riß im dedektierenden System. Diese Tatsache ist vor allem für die Messung instabiler Rißausbreitung, wo es auf eine genaue zeitliche und örtliche Zuordnung ankommt, von großer Bedeutung und erfordert weitere Untersuchungen. Die vorgelegten Ergebnisse zeigen allerdings, daß trotz dieser Einschränkung Rißgeschwindigkeitsverläufe bei instabiler Rißausbreitung gemessen werden können.

Für die Weiterentwicklung von Rißsensoren ergibt sich, daß die Schichtdicken von Träger- und Widerstandsmaterial weiter verringert werden müßten. Denkbar ist auch statt der Widerstandsfolie eine aufgedampfte bzw. aufgesputterte Schicht, die anschließend strukturiert wird. Für Proben mit Seitenkerben bietet sich die hier vorgestellte Kombination aus Sensor und aufgedampften Streifen an, die jedoch spezielle Schablonen und Erfahrung in der Technologie der Bedampfung erfordern. Obwohl sehr aufwendig, ist die Auflösung wesentlich höher als bei der Verwendung von Dehnmeßstreifen, die z. Z. ungefähr bei 5 bis 10 mm liegt.

LITERATUR

- [1] Neumann, H.: Rißfortschritt messen – Ein Sensor für Rißfortschritt und Rißgeschwindigkeit. *Materialprüfung*, 33 (1991) 5, S. 139 – 142.
- [2] Fractomat. Prospekt der Fa. Russenberger Prüfmaschinen AG, Schweiz, 1989.

- [3] Sensoren zur Messung von Rißfortpflanzung, Prospekt der Fa. Vishay Micro-Measurements GmbH, München 1990.
- [4] Rohrbach, C.: Handbuch für die experimentelle Spannungsanalyse, VDJ-Verlag, Düsseldorf, 1989, S. 528/532.
- [5] Löbner, W.: Untersuchungen zum statischen und dynamischen Verhalten von Rissen in Stahl unter besonderer Berücksichtigung des Energiekonzeptes, Diss. A, TU Magdeburg 1981.
- [6] Kalthoff, J. F.; Beinert, J.; Winkler, S.; Klemm, W.: Experimental Analysis of Dynamic Effects in Different Crack Arrest Test Specimens. ASTM Special Technical Publications 711 „Crack Arrest Methodologie and Applications“, 1980, S. 422 – 431.

Anschrift des Verfassers:

Dr.-Ing. Holger Neumann
Technische Universität „Otto von Guericke“
Fakultät für Naturwissenschaften
Institut für Technische Physik
PSF 4120
O-3010 Magdeburg