

ABOUT APPLICABILITY OF HIGH TEMPERATURE STRAIN GAUGES  
AND DIFFERENTIAL TRANSFORMER DISPLACEMENT TRANSDUCERS  
FOR THE INSTRUMENTATION OF  
PRESTRESSED CONCRETE REACTOR VESSELS

(ZUR ANWENDBARKEIT  
VON HOCHTEMPERATUR-DEHNUNGSMESSSTREIFEN  
UND TRANSFORMATOR-WEGAUFNEHMERN  
FÜR DIE INSTRUMENTIERUNG  
VON SPANNBETON-REAKTORDRUCKBEHÄLTERN)

C. AMBERG, N. CZAICA

*Fachgruppe G.1: Messwesen und Regeltechnik,  
Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), D-1 Berlin, Germany*

SUMMARY

In prestressed concrete reactor vessels the transducers are exposed to the interference factors such as temperature and nuclear irradiation, as well as chemical influence (corrosion). From the commercial available systems the following electrical transducers were selected, which seemed to be most suitable for these environmental conditions:

As *strain* sensitive elements, fully encapsulated, weldable high temperature strain gauges with integral leads (stainless steel tube construction, welded on steel band) and with nickel-chrome or platinum-tungsten alloy strain sensitive filaments, for static measurements at temperatures up to 320°C or 500°C; for *displacement* measurements, high temperature differential transformer transducers, with sealed stainless steel housing and integral lead, for temperatures up to 425°C or 580°C.

Beforehand these transducers were investigated as to their temperature-time-behaviour, at first up to 350°C, then to their application limit.

Measurements were taken off: (1) Transducer output versus temperature and temperature hysteresis; (2) drift at various, constant temperatures; (3) sensitivity change through temperature and time, including creep; (4) hysteresis and nonlinearity.

Of the high temperature strain gauges, we generally achieved the following results: The nickel-chrome gauges have the smaller and better predeterminable transducer output versus temperature (apparent strain), but their drift is larger at elevated temperatures. The platinum-tungsten gauges are relatively stable over a longer period of time, and also at a temperature of 400°C, but their apparent strain is large and cannot be determined as accurately.

Therefore a dual measuring device seems to be best: A platinum-tungsten and a nickel-chrome gauge are both installed side by side on the liner. The good initial properties of the nickel-chrome gauge serve to correct the apparent strain of the platinum-tungsten gauge; beyond 320°C (maximal application temperature of the nickel-chrome gauges) it is permitted to extrapolate. In this way the long-time stability and also the reproducibility of the apparent strain of the platinum-tungsten gauge are used to best advantage. For example, at the expected maximal liner temperature of 350°C it is possible to measure thermal stresses for about 10 days with an absolute error  $\pm 100 \cdot 10^{-6}$  m/m.

For the pilot plant altogether 18 strain gauges were installed at the liner of a prestressed concrete vessel and recorded during further vessel mounting. One gauge failed, the others changed during the first half year within  $\pm 130 \cdot 10^{-6}$  m/m, essentially caused by temperature changes.

For investigation of the corrosion influence in prestressed concrete, several internal stress transducers each instrumentated with 2 weldable high temperature strain gauges and differential transformer displacement transducer respectively are prepared for installation in the above mentioned vessel. The behaviour of these transducers under nuclear irradiation is still to be investigated.

## 1. Die Auswahl geeigneter Meßwertaufnehmer

Zur Messung mechanischer Größen an Spannbeton-Reaktordruckbehältern wurden aus einer Vielzahl zunächst möglich erscheinender elektrischer Umwandlungsverfahren in eine elektrische Größe [1] einerseits Dehnungsmeßstreifen (DMS) ausgewählt, da sie ohne komplizierten Ankopplungsmechanismus die wichtige Größe Dehnung direkt zu messen gestatten. Es ist bekannt, daß die Langzeitstabilität der DMS von hohen Temperaturen und Feuchteeinwirkung besonders stark beeinflusst wird, und es wird angenommen, daß selbst relativ temperaturstabile DMS ihre Meßeigenschaften unter Kernstrahlung mehr oder weniger schnell ändern. Deshalb werden andererseits auch Differentialtransformator-Wegaufnehmer untersucht, weil man von ihnen größere Temperatur- und Kernstrahlungsfestigkeit erhofft.

Unter den Dehnungsaufnehmern wurden aufschweißbare Dehnungsmeßstreifen der Firma Microdot-Alltech ausgesucht, deren Meßdraht entweder aus thermisch vorbehandeltem Nickel-Chrom-Draht (Betriebstemperatur für stat. Messungen bis ca. 300 °C) oder aus Platin-Wolfram-Draht (bis ca. 500 °C) besteht [2]. Die Nickelchrom-Legierung ändert ihren Widerstand bei einer Neutronenflußdichte von  $8 \cdot 10^{13}$  n/cm<sup>2</sup>/s innerhalb einiger Tage um ca. 1 % und ist damit nicht kernstrahlungsfest. Bei Verwendung zweier Nickelchrom-Viertelbrücken in Halbbrückenschaltung scheint allerdings durch Kompensation des Kernstrahlungseinflusses der Meßeinsatz für begrenzte Zeit möglich zu sein [3]. Platin-Wolfram ist eine thermisch wesentlich stabilere Legierung und wird häufig für Dehnungsmessungen im Hochtemperaturbereich (dynamische Messungen bis ca. 800 °C) benutzt. Seine Kernstrahlungsfestigkeit ist uns unbekannt.

Diese Dehnungsmeßstreifen bestehen aus einer dünnen, ca. 27 mm langen Drahtschleife als Meßelement in einem Metallröhrchen, fest eingebettet in MgO-Pulver zur Isolation und zur Dehnungsübertragung vom Röhrchen zum Meßdraht [4]. Bei der Halbbrückenausführung ist um den Meßdraht noch ein weiterer Draht als Blindwiderstand (Dummy) derart gewandelt, daß er keine Dehnungen überträgt. Der Meßdraht ist entweder in der Meßlänge von 27 mm abgeätzt oder außerhalb der Meßlänge goldplattiert. Der Anschluß der (dickeren) Meßdrahtenden an die drei Kupfer-Anschlußdrähte (Halbbrücken- oder Dreileiterschaltung) erfolgt beim Hersteller durch Verdrillen und Schweißen. Die drei Kupfer-Anschlußdrähte sind ebenfalls im MgO-Pulver gebettet und mit einem Stahlrohrmantel umgeben. Der vollständig gekapselte Meßwertaufnehmer mit integrierter Leitung wird beim Hersteller druckwassergetestet. Das Meßröhrchen ist mit einer Schweißnaht auf einem kleinen Blechstreifen (Flansch) befestigt, den der Anwender dann auf dem Bauteil aufzuschweißen hat (ca. 50 bis 100 Widerstandsschweißpunkte).

Als Wegaufnehmer wurden die Hochtemperatur-Differentialtransformator-Aufnehmer der Firmen Schaevitz und Ametek ausgesucht. Sie sind ebenfalls einschließlich der MgO-isolierten Leitungsdrähte vollständig gekapselt und haben eine Bohrung für den (beweglichen) Kern. Unter den elektrischen Meßwertaufnehmern scheinen die Differentialtransformator-Wegaufnehmer die geringsten Eigenschaftsänderungen durch Kernstrahlungseinwirkung zu erfahren [5]. Bisher untersuchten wir sowohl die Dehnungs- als auch die Wegaufnehmer zunächst auf ihr Temperatur-Zeit-Verhalten hin.

## 2. Das Temperatur-Zeit-Verhalten von aufschweißbaren Hochtemperatur-Dehnungsmeßstreifen

Drei DMS-Typen wurden voruntersucht, d.h. an einigen wenigen Exemplaren wurden möglichst viele Eigenschaften ermittelt, wobei zu beachten ist, daß für jede weitere Untersuchung die vorangegangenen Messungen eine Vorbehandlung des DMS bedeuteten. Eine Untersuchung

mehrerer Exemplare auf Einzelaussagen hin soll noch erfolgen. Wir untersuchten  
 einen Viertelbrücken-DMS-Typ mit NiCr-Meßdraht, SG 125,  
 einen Halbbrücken-DMS-Typ mit NiCr-Meßdraht, SG 325 und  
 einen Halbbrücken-DMS-Typ mit Pt W-Meßdraht, SG 425.

Die DMS wurden auf einem Nimonic-90-Balken aufgeschweißt. Dieser Balken ist Teil einer Hochtemperatur-DMS-Eichvorrichtung nach Rohrbach und Knublauch und läßt sich induktiv und geregelt bis 750 °C heizen. Durch Balkenbiegung können die DMS um  $\pm 2000 \mu\text{m/m}$  gedehnt bzw. gestaucht werden [6].

## 2.1 Absolute Fehler

Der Temperaturgang der 3 DMS-Typen ist in Bild 1 für je ein typisches Exemplar aufgezeichnet. Prinzipiell ist ein Unterschied zwischen dem ersten (I) und dem zweiten (II) Temperaturzyklus nach dem Aufschweißen zu erkennen. Der zweite Temperaturgang ist dann zunächst gut reproduzierbar. Der Verlauf der NiCr-DMS ändert sich jedoch, wenn sie etwa 1 Woche lang Temperaturen bis zu ihrer vom Hersteller angegebenen Grenztemperatur für statische Messungen von 340 °C ausgesetzt sind (III), und bei Temperaturen oberhalb dieser Grenztemperatur (diese NiCr-DMS sollen dynamisch bis ca. 800 °C einsetzbar sein) wird die durch spezielle Wärmebehandlung temperaturselbstkompensierte Legierung instabil, d.h. die vom Hersteller bewirkte Anpassung an eine bestimmte Temperatur-Bauteilausdehnung stimmt nicht mehr; der Temperaturgang wird sehr groß (IV). Im Gegensatz dazu zeigt der PtW-Halbbrücken-DMS SG 425 auch nach fünfwöchiger Temperatureinwirkung bis zur angegebenen Grenztemperatur für statische Messungen von 510 °C noch den Verlauf des zweiten Temperaturzyklus nach dem Aufschweißen (V). Diese PtW-DMS haben prinzipiell eine Temperaturhysterese, d.h. beim Aufheizen einen anderen Temperaturgangverlauf als beim Abkühlen. Diese Temperaturhysterese ist zeitunabhängig. Es ist anzunehmen, daß beide Viertelbrückenarme dieses DMS-Typs eine relativ kleine Temperaturhysterese haben, was sich aber in der Halbbrückenschaltung absolut stark bemerkbar macht, da der hier gemessene Temperaturgang eine kleine Differenz großer Viertelbrücken-Widerstandsänderungen ist: Die PtW-Legierung ändert ihren Widerstand um entsprechend ca.  $65 \mu\text{m/m}^\circ\text{C}$ , so daß die hier bis 400 °C gemessene Hysterese von ca.  $75 \mu\text{m/m}$  nur etwa 3 % des Temperaturganges eines Viertelbrückenarmes von ca.  $25.000 \mu\text{m/m}$  ausmacht. So ist es verständlich, daß der Temperaturgang der einzelnen PtW-DMS-Exemplare von der typischen Form in Bild 1-3 etwas abweicht. Der hier gezeigte Temperaturgang ist bereits optimiert, d.h. durch Vorschalten eines Temperaturkompensationswiderstandes  $R_{TC}$  vor der aktiven DMS-Viertelbrücke der unbehinderten Temperaturexpansion des Bauteilmaterials angepaßt. Der bei Raumtemperatur konstant gehaltene  $R_{TC}$  bewirkt in der Brückendiagonalen eine geringere Auswirkung der temperaturbedingten Widerstandsänderung der aktiven Viertelbrücke gegenüber derjenigen der passiven Viertelbrücke und sollte mit einem Fehler  $< 0,1 \Omega$  bestimmt werden. Aus Bild 2 sind sowohl die Wirkungsweise der  $R_{TC}$ -Optimierung (Kurven 1, 2 und 3) als auch die gute Konstanz des optimierten Temperaturganges ersichtlich. Selbst nach siebenwöchiger Temperatureinwirkung bis 600 °C, davon eine Woche lang über der angegebenen Grenztemperatur für statische Messungen von 510 °C, wurde ein nur gering abweichender Temperaturgang gemessen (Kurve 4), dessen Verlauf sicherlich von der zwischendurch erfolgten Behandlung (k-Faktor- und Kriechmessungen) bei anderen Temperaturen abhängig ist. Danach hatte der Temperaturgang innerhalb einer Schwankungsbreite von  $\pm 30 \mu\text{m/m}$  bis 500 °C wieder den Anfangsverlauf (Kurven 5 und 6).

Das Nullpunktdriften bei verschiedenen, konstanten Temperaturen ist in Bild 3 für die Typen SG 125 und SG 425 als mittleres Verhalten je dreier Exemplare aufgetragen. Für einen einwöchigen Meßeinsatz und einen zulässigen Driftfehler von  $\pm 100 \mu\text{m/m}$  gilt folgende Aufstellung:

	SG 125	SG 425
innerhalb $\pm 40 \mu\text{m/m}$ keine Drift meßbar unter	280 °C	350 °C
obere Grenztemperatur für statische Messungen	300 ... 320 °C	450 ... 500 °C

## 2.2 Relative Fehler

Die Änderung der Empfindlichkeit mit der Temperatur entspricht für alle 3 Typen im wesentlichen den Herstellerangaben und ist gut reproduzierbar (Bild 4). Eine zeitliche Änderung der Empfindlichkeit wurde nicht festgestellt.

Hysteresis und Nichtlinearität eines typischen DMS-Exemplars sind aus Bild 5 zu ersehen. Bei Erstbelastung und nach dem Wechsel der Belastungsrichtung ist die Charakteristik nicht-linear; alle folgenden Belastungszyklen in der gleichen Richtung sind besser linear, reproduzierbar, haben eine kleine Hysteresis und zeigen keine bleibende Dehnung nach Entlastung. Ein ähnlicher Unterschied zwischen erster und zweiter Belastung in gleicher Belastungsrichtung tritt nach längerer Temperatureinwirkung auf.

Das Kriechen der DMS-Typen SG 125 und SG 425 wurde bei Dehnungen  $\pm 1500 \mu\text{m/m}$  gemessen (Bild 6). Während die NiCr-Viertelbrücken-DMS SG 125 bis 370 °C innerhalb  $\pm 25 \mu\text{m/m}$ , d.h. innerhalb  $\pm 1,7 \%$ , nicht kriechen, ist dieser Effekt bei den PtW-Halbbrücken-DMS SG 425 stark ausgeprägt. Sie kriechen stärker mit steigender Temperatur und Belastung (relatives Kriechen). Das Kriechen erhöht die relativen Fehler des DMS-Typs SG 425 erheblich.

## 3. Die Vorherbestimmung des Temperaturganges von aufschweißbaren Hochtemperatur-Dehnungsmeßstreifen mithilfe einer Klemmvorrichtung

Während einerseits die Herstellerangaben der Empfindlichkeit und auch ihrer Temperaturabhängigkeit genau genug sind und andererseits eine individuelle Vorherbestimmung des Driftens und Kriechens nicht sinnvoll ist, da die Übertragbarkeit auf die realen Bedingungen nur unbefriedigend möglich ist, sehen wir eine reale Chance zur Meßwert-Korrektur in der Vorherbestimmung des Temperaturganges. Der Temperaturgang der NiCr-DMS ist vom jeweiligen Herstellungslos abhängig und der Temperaturgang der PtW-DMS sogar von Exemplar zu Exemplar unterschiedlich. Sollen die DMS zur Messung von Wärmespannungen herangezogen werden, so muß ihr Temperaturgang auf dem sich unbehindert ausdehnenden Bauteilmaterial bekannt sein, damit durch Differenzbildung zum Meßwert auf dem Bauteil die Dehnungsbehinderung ermittelt werden kann. Der Hersteller gibt zwar für alle 3 DMS-Typen je eine generelle Kurvenform des Temperaturganges an, jedoch sind selbst bei den selbstkompensierenden, durch Temperaturbehandlung an das Bauteilmaterial angepaßten, NiCr-DMS folgende Fehler zu erwarten:

- Für die Anpassung benötigt der Hersteller vom Anwender die Angabe der Temperaturexpansion des Bauteilmaterials. Erfolgt dies mit einem Fehler von  $\pm 0,25 \mu\text{m/m}^\circ\text{C}$ , so ist der Temperaturgang bei 300 °C schon um  $\pm 70 \mu\text{m/m}$  unsicher. Dieser Fehler kann vermieden werden, wenn man dem Hersteller eine Probe des Bauteilmaterials schicken kann.
- Die Anpassung wird dem Hersteller nur innerhalb einer Fehlergrenze möglich sein.
- Selbst die Kurvenform des ideal angepaßten DMS ist von der Art der Nichtlinearität der

Temperaturausdehnung des Bauteilmaterials abhängig.

Um diese Fehler zu vermeiden, ist bei NiCr-DMS zumindest eine stichprobenartige Untersuchung des Temperaturganges von aufgeschweißten Exemplaren des gelieferten Herstellungsloses auf dem Bauteilmaterial nötig (verlorene DMS). Jedoch ist der Temperaturgang der PtW-DMS so nicht vorherbestimmbar, da ihr  $R_T$ -Widerstand individuell optimiert werden muß. Wir schlagen deshalb eine individuelle Vorherbestimmung des Temperaturganges aller zum Meßeinsatz vorgesehenen DMS-Exemplare mithilfe einer Klemmvorrichtung aus Bauteilmaterial vor. Die DMS ändern ihre Eigenschaften dabei praktisch nicht, und man erhält damit weitere Informationen, die die Vorherbestimmung des DMS-Verhaltens auf dem Bauteil erleichtern bzw. erst ermöglichen:

- den tatsächlichen Verlauf des Temperaturganges auf dem Bauteilmaterial,
- die Differenz zwischen erstem und zweitem Temperaturzyklus, die der Hersteller nicht angibt,
- bei NiCr-DMS die Exemplarstreuungen, die trotz relativ guter Übereinstimmung (s. Bild 10) noch innerhalb eines Loses auftreten,
- eine Funktionskontrolle,
- für die PtW-DMS ergibt sich nach unseren Erfahrungen überhaupt erst damit die Möglichkeit, den  $R_T$ -Wert durch schrittweises Herantasten zu optimieren,
- der optimierte Temperaturgang der PtW-DMS ist dann in seiner Kurvenform einschließlich der Temperatur-Hysterese bekannt.

Die Klemmvorrichtung (Bild 7) besteht aus einer 5 mm starken Grundplatte (1), auf deren geschliffene Seite der DMS (3) mithilfe eines Klemmstückes (2) mit geschliffenen Stegen durch die Kraft von 4 Schrauben (4) gedrückt wird. Grundplatte und Klemmstück müssen aus Bauteilmaterial gefertigt werden. Die Einspannkraft wurde nach Messung der DMS-Federsteifigkeit so berechnet, daß für Stahl als Bauteilmaterial die durch das Erwärmen bis 300 °C in den DMS entstehenden Längskräfte mittels Haftreibung von den auf 3 mm Länge geschätzten Kraft-einleitungszone an den Enden der DMS aufgenommen werden können. Die DMS sind gegen Ausbeulen in ihrer ganzen Länge angepreßt. Die bisher vorherbestimmten Temperaturgangkurven der NiCr-DMS waren auch nach wiederholtem Einspannen bis 300 °C innerhalb  $\pm 15 \mu\text{m/m}$  reproduzierbar. Es zeigte sich der gleiche Unterschied zwischen erstem und zweitem Temperaturzyklus nach dem Einspannen, wie er vorher bei aufgeschweißten Exemplaren gemessen wurde. Der Temperaturgang der PtW-DMS SG 425 ließ sich bis 300 °C nur mit einem Fehler von ca.  $\pm 60 \mu\text{m/m}$  bestimmen. Die Übertragbarkeit des so vorherbestimmten Temperaturganges auf den geschweißten Zustand zeigen die Bilder 8 und 9. Wird auf gleichem Material geklemmt und geschweißt, so entsteht die aus Bild 8 ersichtliche gute Übereinstimmung der Temperaturgänge im geklemmten (1) und im geschweißten (2) Zustand, sowohl für den ersten als auch für den zweiten Temperaturzyklus. Dabei ist die Vorherbestimmung beim NiCr-Halbbrücken-DMS SG 325 (a) mit einem Fehler  $< \pm 10 \mu\text{m/m}$  bei 300 °C gelungen, während die Unterschiede zwischen den zugehörigen Kurven des PtW-Halbbrücken-DMS SG 425 (b) die Fehlergrenzen des Einspannverfahrens bei der Vorherbestimmung des Temperaturganges dieses DMS-Typs andeuten. Bild 9 zeigt, daß sich auch die in einer Nimonic-Klemmvorrichtung (a) ermittelten Temperaturgänge dreier Exemplare (1, 2, 3) des NiCr-Viertelbrücken-DMS-Typs SG 125 mit deren Temperaturgängen im aufgeschweißten Zustand auf einem nichtlegierten Stahl (b) vergleichen lassen. Die Kurven a und b unterscheiden sich annähernd um den Betrag der Ausdehnungsdifferenz beider Materialien, die für den vorliegenden Anwendungsfall nicht genau bestimmt wurde.

Die Vorherbestimmung des Temperaturganges der PtW-DMS-SG 425 ist nur innerhalb einer größeren Fehlergrenze möglich, während der Temperaturgang der NiCr-DMS SG 125 und SG 325 wesentlich genauer vorherbestimmt werden kann. Um die guten Hochtemperatureigenschaften und evtl. die bessere Kernstrahlungsfestigkeit der stabileren PtW-DMS mit den kleinen Temperaturgangfehlern der NiCr-DMS zu verbinden, schlagen wir für Wärmespannungsmessungen die Anwendung des Prinzips einer Doppelmeßstelle vor: Je ein PtW-DMS und ein NiCr-DMS werden unmittelbar nebeneinander (bzw. an Orten gleicher Temperatur und Dehnung) auf dem Bauteil befestigt. Die guten Anfangseigenschaften des NiCr-DMS dienen zur Korrektur des Temperaturganges des PtW-DMS (durch Extrapolation auch über die maximale Betriebstemperatur von ca. 320 °C des NiCr-DMS hinaus); die Langzeitstabilität und auch Reproduzierbarkeit des Temperaturganges des PtW-DMS - wenn einmal bekannt - werden optimal genutzt. Zum Beispiel können durch diesen kombinierten Einsatz der beiden DMS-Typen bei der erwarteten maximalen Dichthaut-Temperatur eines Spannbeton-Reaktorbehälters von 350 °C Wärmespannungsmessungen etwa 10 Tage lang mit einem absoluten Meßfehler  $\pm 100 \mu\text{m/m}$  durchgeführt werden. Voraussetzung dafür ist die Vorherbestimmung des Temperaturganges beider DMS in einer Klemmvorrichtung, wobei der Temperaturkompensationswiderstand  $R_{TC}$  des PtW-DMS optimiert wird.

#### 4. Versuchseinsatz von aufschweißbaren Hochtemperatur-Dehnungsmeßstreifen in einem Spannbeton-Reaktordruck-Modellbehälter

Zur Untersuchung des Verhaltens der DMS unter realen Bedingungen wurden 10 NiCr-Viertelbrücken-DMS SG 125, 3 NiCr-Halbbrücken-DMS SG 325 und 5 PtW-Halbbrücken-DMS SG 425 im geraden Teil des Dichthautzylinders eines Spannbeton-Reaktordruck-Modellbehälters der Reaktorbau- Forschungs- und Baugesellschaft im Reaktorzentrum Seibersdorf/Österreich installiert. Zuvor wurden die Temperaturgänge aller DMS-Exemplare mit Klemmvorrichtungen aus Dichthautmaterial vorherbestimmt (Bild 10). Dabei stimmten alle 10 Exemplare SG 125 innerhalb der angegebenen Streubereiche für den ersten und zweiten Temperaturzyklus überein. Zwei Exemplare SG 325 zeigten gute Übereinstimmung im zweiten Temperaturzyklus; der DMS Nr. 11 war als unsicher anzusehen, da sein Temperaturgang trotz mehrmaligen Einspannens nicht eindeutig vorherbestimmt werden konnte. Für die 5 Exemplare SG 425 wurde durch schrittweises Ändern des Temperatur-Kompensationswiderstandes  $R_{TC}$  der Temperaturgang optimiert. Dazu mußten mehrere Temperaturzyklen durchfahren werden. Im angegebenen Streubereich wird der Temperaturgang der 5 PtW-DMS-Exemplare beim zweiten Temperaturzyklus nach dem Aufschweißen erwartet. Hier soll das Prinzip der Doppelmeßstelle angewandt werden, indem der Temperaturgang der PtW-DMS mit den Meßwerten derjenigen NiCr-DMS korrigiert wird, die aufgrund ihrer geometrischen Anordnung an der Dichthaut der gleichen Dehnung ausgesetzt sind.

Die DMS und einige Mantelthermoelemente wurden in 4 nebeneinanderliegenden "Beul"-Feldern der 5 mm starken Dichthaut angeordnet (Bild 11). Zum mechanischen Schutz der Aufnehmer und zur definierten Abgrenzung der Aufnehmerhohlräume wurden 15 der 18 DMS mit u-förmigen Abdeckprofilen aus Stahl überdeckt; die Spalte wurden gegen hineinlaufenden Beton mit temperaturfestem, keramischem Kitt abgedichtet, von dem keine stabile Klebewirkung zu erwarten ist (Bild 12). Außerdem wurden die einzelnen DMS und ihre Kabel im Isolierbetonbereich wie im Spannbetonbereich zum Schutz gegen Korrosion bzw. Abbinden im Beton verschiedenartig abgedeckt. Zur Vermeidung von Rückwirkungen auf die Dichthaut sind die Abdeckprofile nur über dünne Haltebleche durch Punktschweißen an der Dichthaut angeheftet (Bild 13). Mit der sta-

bilen Bauweise der Abdeckprofile sollen Unsicherheiten in den Auflagebedingungen der Dicht-  
haut vermieden werden, die sonst in den Randzonen der Aufnehmerhohlräume entstehen könn-  
ten. Die Hohlräume sind 6 mm breit und 75 bzw. 120 mm lang. Aus den in [7] beschriebenen  
Versuchen geht hervor, daß in einem 6 mm breiten Hohlraum einer 5 mm starken Dichthaut  
weitgehend unabhängig von der Länge des Hohlraumes bei einem Behälterdruck von 50 atü die  
Meßwertverfälschung kleiner als  $20 \mu\text{m/m}$  ist. Die als Blind-DMS vorgesehenen Exemplare sind  
auf je einem Kompensationsstab 5 aus Dichthautmaterial aufgeschweißt, der seinerseits über  
eine dünne Blechschlaufe 6 mit der Dichthaut verbunden ist. Dadurch wird die Dichthautdeh-  
nung nur zu 1 % auf den Kompensationsstab übertragen (berechnet); die Balkentemperatur  
liegt höchstens 3 % unter der Dichthauttemperatur (gemessen).

Die DMS wurden vor dem Betonieren und danach während der weiteren Behältermontage in  
Zeitabständen von ein bis 25 Tagen registriert. Die Meßergebnisse des ersten halben Jahres  
seit dem DMS-Aufschweißen sind im Bild 14 nach den 3 DMS-Typen getrennt dargestellt. Die  
Anzeigeschwankungen sind durch die aufgetretenen Temperaturschwankungen im Behälter und in  
der Brückenergänzungsschaltung an der Baustelle bedingt; das Exemplar 7 ist ausgefallen,  
die Exemplare 10 und 11 sind unsicher.

Um auch den Korrosionseinfluß des Spannbetons auf diese Hochtemperatur-DMS zu überprüfen,  
verwendeten wir fünf NiCr-Viertelbrücken-DMS SG 125 in drei Betoninnendehnungsaufnehmern.  
Je ein bzw. zwei DMS wurden auf einem Röhrchen aus nichtlegiertem Stahl in Achsrichtung  
aufgeschweißt. Zur Übertragung der Betondehnung auf das Röhrchen wurden an den Röhrchen-  
enden Flansche angebracht. Die DMS wurden zwar mechanisch geschützt, sind aber der che-  
mischen Wirkung des umgebenden Spannbetons ausgesetzt, wie das auch bei einer Dehnungsmes-  
sung an Spannseilen oder Bewehrungsstäben der Fall wäre. Diese Betoninnendehnungsaufnehmer  
sind in o.a. Behälter eingebaut worden. Die DMS wurden auf Null abgeglichen; Meßwerte sind  
noch nicht anzugeben.

#### 5. Zum Temperatur-Zeit-Verhalten von Hochtemperatur-Differentialtransformator-Wegaufnehmern

Bisher wurden 2 Exemplare des Aufnehmer-Typs 101-KS-ZTR der Firma Schaevitz untersucht  
[8]. Sie haben einen Meßbereich von  $\pm 2,5 \text{ mm}$  und sind für eine maximale Betriebstempera-  
tur von  $580^\circ\text{C}$  vorgesehen. Das vollständig gekapselte Spulengehäuse dieser Aufnehmer wurde  
zur Untersuchung in seiner Spulenmittenebene ringförmig eingespannt. In der Gehäusebohrung  
wurde der ferromagnetische Kern, eine Nickel-Chrom-Legierung, axial beweglich angeordnet.  
Die Primärspule wurde mit einer konstanten Spannung  $5 V_{\text{eff}}$ , 5 kHz aus einem Trägerfre-  
quenzverstärker gespeist. Da von der Lage des Kernes die Verteilung der in den Sekundär-  
spulen induzierten Spannungen abhängt, ist die Spannungsdifferenz der gegeneinanderge-  
schalteten Sekundärspulen ein Maß für den vom Kern zurückgelegten Weg. Sie wurde im Träger-  
frequenzverstärker verstärkt, phasenempfindlich gleichgerichtet und danach digital ange-  
zeigt. Die Testvorrichtung besteht aus einem Muffelofen und der darin angeordneten Spulen-  
Einspannung sowie einer Wegübertragungsvorrichtung, mit der die außerhalb des Ofens mit-  
hilfe einer Mikrometerschraube erzeugte Bewegung auf den Kern übertragen wird. Sie hat  
einen Temperaturgang, der innerhalb des angegebenen Streubereiches in Bild 15 liegt. Ihre  
Fehlerkorrektur ist einschließlich des Mikrometerschraubenfehlers mit  $\pm 0,5 \mu\text{m}/100^\circ\text{C}$   
 $\pm 1 \mu\text{m}$  möglich. Das typische Temperatur-Zeit-Verhalten des Aufnehmers ist in Bild 15 dar-  
gestellt. Prinzipiell kann gesagt werden, daß alle Meßergebnisse bis  $350^\circ\text{C}$  innerhalb  
14 Tagen Meßzeit gut reproduzierbar waren. Die Nullpunktverschiebung durch den Temperatur-

gang des Aufnehmers ist mit ca. 100  $\mu\text{m}$  bei 350  $^{\circ}\text{C}$  unter 5 % des Meßbereiches von  $\pm 2,5$  mm. Die zeitliche Drift bei konstanten Temperaturen bis 350  $^{\circ}\text{C}$  liegt bei jeweils zwei Tagen Meßzeit innerhalb des Fehlers der Anordnung von  $\pm 2$   $\mu\text{m}$ . Die Empfindlichkeit sinkt bis 350  $^{\circ}\text{C}$  um ca. 5,7 %/100  $^{\circ}\text{C}$ .

Über 350  $^{\circ}\text{C}$  ändert der Aufnehmer seine Eigenschaften mit der Zeit. So sank die Empfindlichkeit bei 475  $^{\circ}\text{C}$  in einem Tag um ca. 2 %, bei 540  $^{\circ}\text{C}$  in 5 Tagen um ca. 30 %. Nach Abkühlung auf Raumtemperatur blieb dieser Empfindlichkeitsrückgang, auch bei Verwendung eines anderen Kernes, erhalten. Er ist auf eine Änderung im Spulengehäuse zurückzuführen, wahrscheinlich auf eine irreversible Permeabilitätsänderung eines magnetischen Leiters im Spulengehäuse.

Die Weg-Spannungs-Charakteristik des Aufnehmers ist eine Gerade mit den in Bild 16 aufgezzeichneten Abweichungen  $\Delta X_A$ , die aus der Abweichung der Meßwerte von einer mittleren Ausgleichsgeraden berechnet wurden. Eine Temperaturabhängigkeit dieser Nichtlinearität wurde nicht festgestellt. Der Aufnehmer hat keine Hysterese.

Zum Versuchseinsatz unter realen Bedingungen im Spannbetonbereich des o.a. Behälters wurde einer der beiden untersuchten Aufnehmer 101-XS-ZTR innerhalb eines Betoninnendehnungsaufnehmers als Wegaufnehmer eingesetzt. Dazu wurde er in einem Metallrohr untergebracht, das nicht feuchtdicht abgeschlossen ist. Meßwerte sind noch nicht anzugeben.

-----

Wir danken den Herren G. Niessen und W. Wulkau für die zuverlässige Arbeit bei der Vorbereitung der Versuche, den Herren ing.grad. K. Gräber, cand. phys. G. Liedtke und ing.grad. M. Pawar für die gewissenhafte Durchführung der Messungen und den österreichischen Mitarbeitern der Reaktorbau- Forschungs- und Baugesellschaft (RFB) und der Studiengesellschaft für Atomenergie (SGAE) für ihre große Bereitschaft zur Zusammenarbeit. - Die Arbeit wurde im Rahmen des SEB-Programms zur Entwicklung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern vom Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) gefördert.

#### Literatur

- [1] Rohrbach, Chr., "Handbuch für elektrisches Messen mechanischer Größen", VDI-Verlag Düsseldorf
- [2] Technische Daten der Firma Microdot/Ailtech.
- [3] Pettigrew, M.J., "An evaluation of weldable strain gages in nuclear-reactor environments", Exp. Mech. 10 (1970), pp 203 - 209
- [4] Gibbs, J.P., "Two types of hightemperature weldable strain gages: Ni-Cr halfbridge filaments an Pt-W-halfbridge filaments", Exp. Mech. 7 (1967) 8, pp. 19A - 26A
- [5] Kircher, J.F. and Bowman, R.E.: "Effects of radiation on materials and components", Reinhold Publishing Corporation
- [6] Knublauch, E., "Über die Messung einiger Eigenschaften von Hochtemperatur-Dehnungsmeßstreifen und ihre Deutung", Diplomarbeit (1966)
- [7] Magiera, G. und N. Czaika, "Über die Voraussetzungen für Messungen an Belägen, insbesondere an der Dichthaut von Spannbeton-Druckbehältern für Kernreaktoren", Materialprüfung 14 (1972) Nr. 8, S. 260 - 262
- [8] Technische Unterlagen der Firma Schaevitz



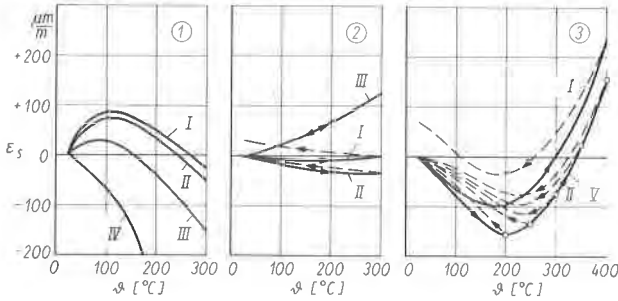


Bild 1: Temperaturgang von aufgeschweißten Hochtemperatur-Dehnungsmeßstreifen (HT-DMS) auf Nimonic 90

- 1: NiCr-Viertelbrücken-DMS SG 125
- 2: NiCr-Halbbrücken-DMS SG 325
- 3: PtW-Halbbrücken-DMS SG 425

- I: erster Temperaturzyklus nach dem Aufschweißen;  $\tau = 0$
- II: zweiter Temperaturzyklus nach dem Aufschweißen;  $\tau \approx 0$
- III: nach  $\tau = 1$  Woche bei  $\vartheta = 280 \dots 350 \text{ }^\circ\text{C}$
- IV: nach  $\tau = 1$  Tag bei  $\vartheta = 400 \text{ }^\circ\text{C}$
- V: nach  $\tau = 5$  Wochen bei  $\vartheta = 300 \dots 510 \text{ }^\circ\text{C}$

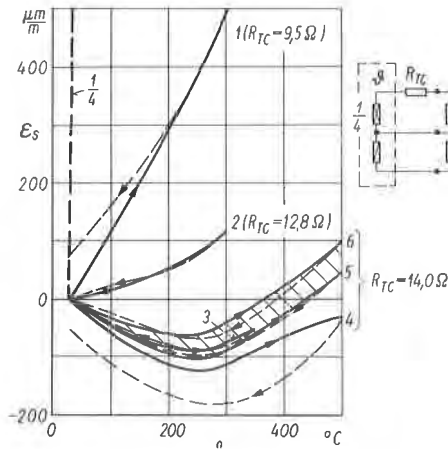


Bild 2: Temperaturgang eines aufgeschweißten HT-DMS SG 425 mit PtW-Meßdraht: Einfluß des  $R_{TC}$ -Widerstandswertes und Verhalten nach längerer, wechselnder Beanspruchung

- 1, 2 und 3:  $\tau \approx 0$ , Optimierung des  $R_{TC}$ -wertes nach dem Aufschweißen
- 4: nach  $\tau = 7$  Wochen bei  $\vartheta = 300 \dots 600 \text{ }^\circ\text{C}$  und nach ca. 30 Lastwechseln  $\pm 1500 \text{ } \mu\text{m/m}$
- 5, 6: Bereich des Temperaturgangverlaufes nach 4
- 1/4: Temperaturgang der aktiven Viertelbrücke

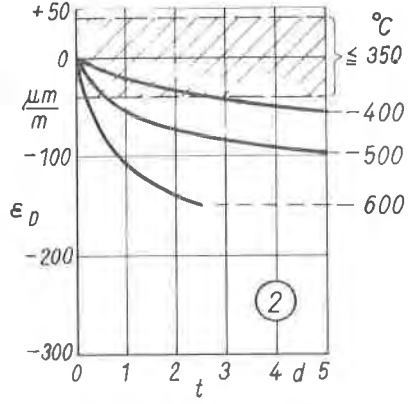
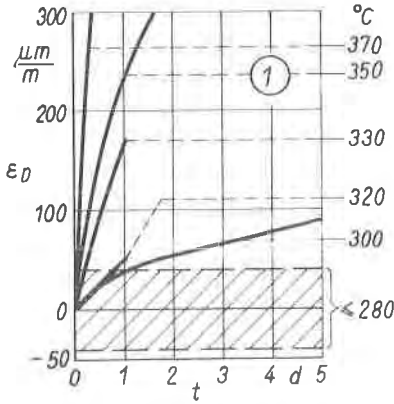


Bild 3: Nullpunktdrifts aufgeschweißter HT-DMS als Funktion der Zeit

- 1: NiCr-Viertelbrücken-DMS SG 125
- 2: PtW-Halbbrücken-DMS SG 425

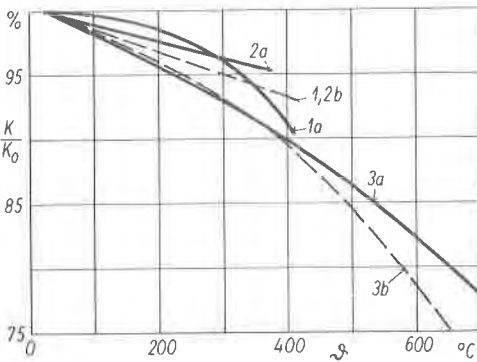


Bild 4: Temperaturabhängigkeit der Empfindlichkeit von aufgeschweißten HT-DMS

$K_0$  = k-Faktor bei Raumtemperatur

a = gemessen

b = Herstellerangabe

- 1: NiCr-Viertelbrücken-DMS SG 125
- 2: NiCr-Halbbrücken-DMS SG 325
- 3: PtW-Halbbrücken-DMS SG 425

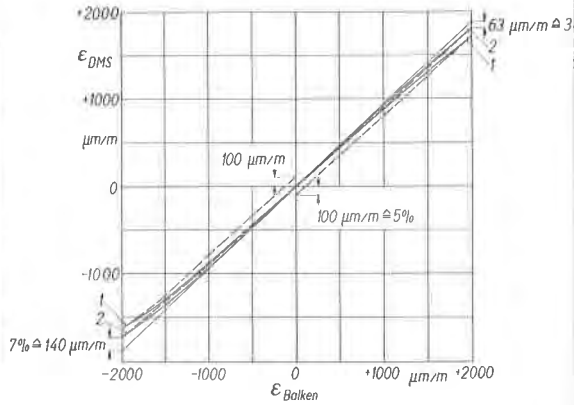


Bild 5: Typische Charakteristik eines aufgeschweißten HT-DMS (hier SG 325): Ausgangsgröße  $\epsilon_{DMS}$  als Funktion der aufgetragenen Dehnung  $\epsilon_{Balken}$

- 1: erste Belastung nach Wechsel der Belastungsrichtung
- 2: folgende Belastungen in der gleichen Belastungsrichtung

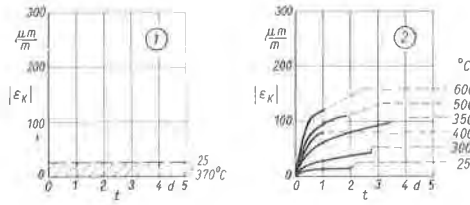


Bild 6: Kriechen aufgeschweißter HT-DMS als Funktion der Zeit bei  $\pm 1500 \mu\text{m/m}$

1: NiCr-Viertelbrücken-DMS SG 125

2: PtW-Halbbrücken-DMS SG 425

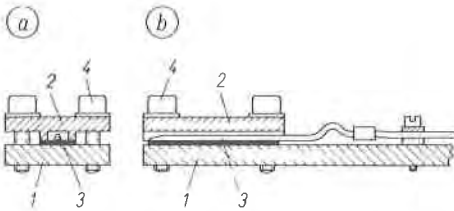


Bild 7: Klemmvorrichtung zur zerstörungsfreien Vorherbestimmung des Temperaturganges von aufschweißbaren HT-DMS:

- a: Querschnitt
- b: Längsschnitt
- 1: Grundplatte
- 2: Klemmstück
- 3: DMS
- 4: Schrauben

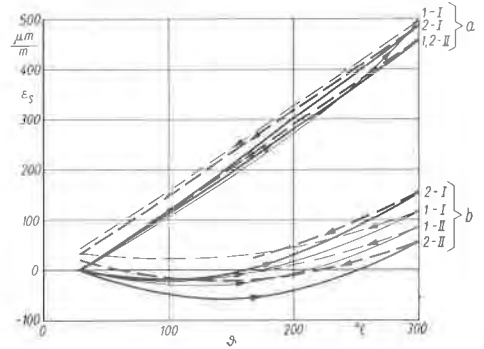


Bild 8: Vergleich der Temperaturgangmessungen im geklemmten (1) und im geschweißten (2) Zustand auf Nimonic

a: NiCr-Halbbrücken-DMS SG 325

b: PtW-Halbbrücken-DMS SG 425

I: Erster Temperaturzyklus nach dem Einspannen bzw. Aufschweißen

II: folgende Temperaturzyklen

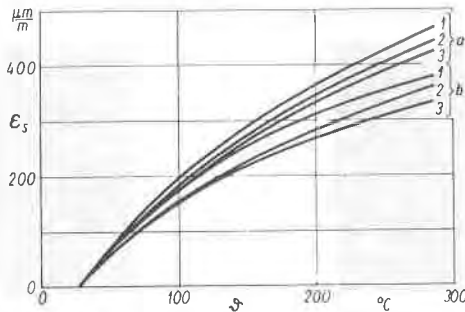


Bild 9: Vergleich der Temperaturgangmessungen im geklemmten und im geschweißten Zustand

a: in einer Nimonic-Klemmvorrichtung ermittelt

b: im aufgeschweißten Zustand auf nichtlegiertem Stahl ermittelt

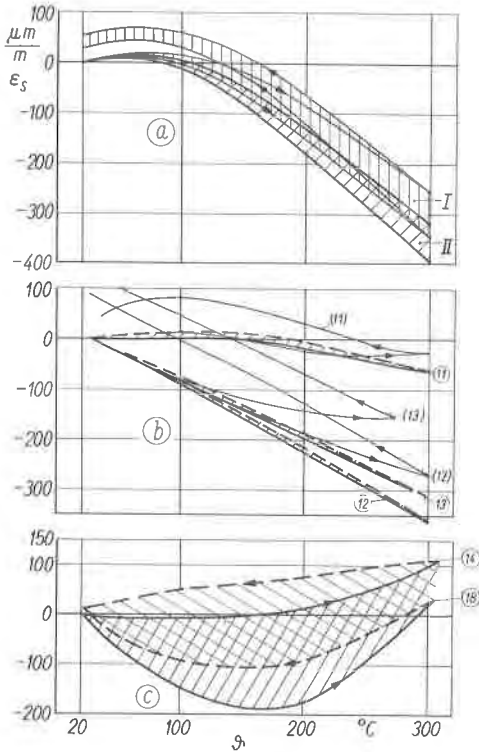


Bild 10: Versuchseinsatz von Hochtemperatur-Dehnungsmessstreifen an der Dichthaut des Spannbeton-Modell-Druckbehälters der RFB im Reaktorzentrum Seibersdorf/Österr.: Temperaturgänge der für den Versuchseinsatz vorgesehenen HT-DMS, vorherbestimmt in Einspannvorrichtungen aus Dichthautstahl

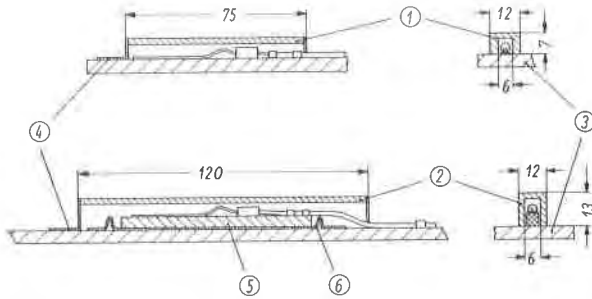
- a: Bereich der 10 NiCr-Viertelbrücken-DMS SG 125
  - b: 3 NiCr-Halbbrücken-DMS SG 325
  - c: Bereich der 5 PtW-Halbbrücken-DMS SG 425 nach der  $R_{Tn}$ -Optimierung
- I bzw. ( ): erster Temperaturzyklus nach dem Einspannen  
 II bzw. ○: folgende Temperaturzyklen



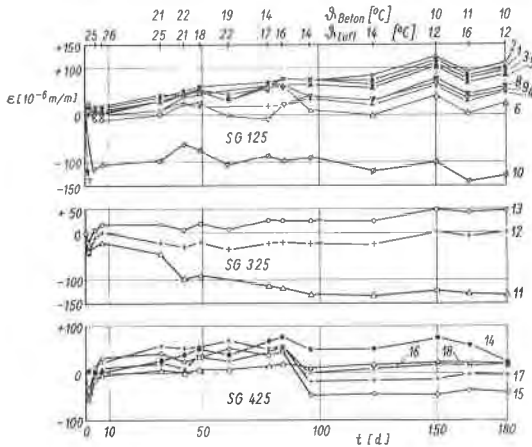
Bild 11: Versuchseinsatz von HT-DMS an der Dichthaut  
 3 aktive DMS, 1 Blind-DMS und  
 1 Thermoelement in einem Beulfeld



Bild 12: Versuchseinsatz von HT-DMS an der Dichthaut  
 Mechanische Abdeckungen zur definierten Abgrenzung der Aufnehmerhohlräume sowie Schutzmaßnahmen gegen das Hineinlaufen von Beton in die Hohlräume



**Bild 13:** Versuchseinsatz von HT-DMS an der Dichthaut  
 Ausführung einer aktiven und einer Blind-Meßstelle  
 1: Abdeckprofil eines aktiven DMS  
 2: Abdeckprofil eines Blind-DMS  
 3: Dichthaut  
 4: Halteblech des Abdeckprofils  
 5: Kompensationsstab für den Blind-DMS  
 6: Blechschlaufe zur Befestigung des Kompensationsstabes



**Bild 14:** Versuchseinsatz von HT-DMS an der Dichthaut  
 Meßwerte des ersten halben Jahres nach dem Aufschweißen  
 SG 125: NiCr-Viertelbrücken-DMS  
 SG 325: NiCr-Halbbrücken-DMS  
 SG 425: PtW- Halbbrücken-DMS

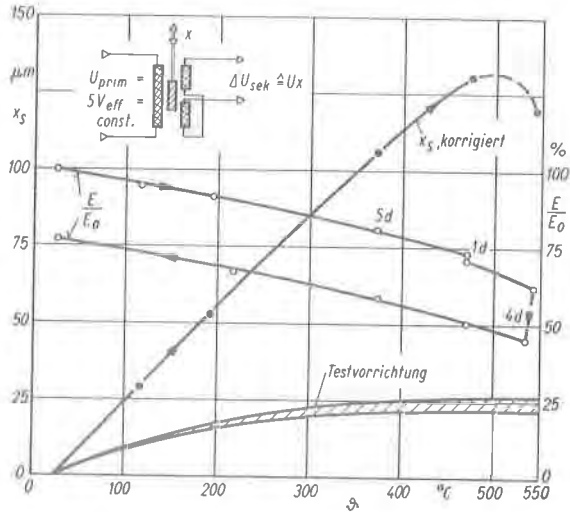


Bild 15: Hochtemperatur-Differentialtransformator-Wegaufnehmer 101 - XS - ZTR  
Temperatur-Zeit-Verhalten bis 540  $^{\circ}\text{C}$

$\frac{E}{E_0}$  : relative Empfindlichkeit, auf Raumtemperatur bezogen

$x_{S, \text{korrigiert}}$ : Nullpunkt-Temperaturgang des Aufnehmers, korrigiert um den Temperaturgang der Testvorrichtung

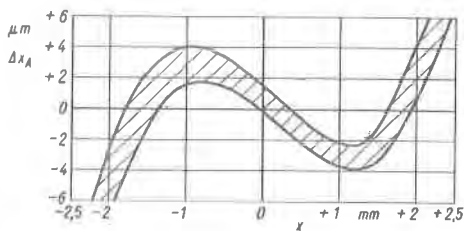


Bild 16: Hochtemperatur-Differentialtransformator-Wegaufnehmer 101 - XS - ZTR  
Nichtlinearität der Aufnehmer-Charakteristik