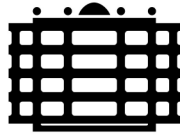


**Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur
Dehnungsübertragung auf anschweißbare Hochtemperatur-
Röhrchen-Dehnungsmessstreifen**



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik
Institut für Mechanik
Professur Experimentelle Mechanik

Studienarbeit

eingereicht von: cand.-ing. Sascha Müller

betreuender Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. habil. Jochen Naumann

Fachbetreuer: PD Dr.-Ing. habil. Martin Stockmann

eingereicht am: 3. Dezember 2003

Müller, Sascha

Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Dehnungsübertragung auf
anschweißbare Hochtemperatur-Röhrchen-Dehnungsmessstreifen

Studienarbeit an der Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik an der Technischen
Universität Chemnitz, Institut für Mechanik, 2003

34 Seiten

28 Abbildungen

9 Tabellen

Die Aufgabenstellung wurde während der Arbeit dahingehend geändert, dass ein Kapitel der
metallographischen Untersuchung der Mikroschweißpunktverbindungen zusätzlich
aufgenommen wurde. Die metallographischen Aufnahmen sind in Zusammenarbeit mit dem
Lehrstuhl für Verbundwerkstoffe an der Technischen Universität Chemnitz entstanden. Dafür
entfiel die Teilaufgabe der Verifikation des aufgestellten Modells mittels einer CCD-Kamera.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Aufgabenstellung	1
2	Hochtemperatur-Röhrchen-Dehnungsmessstreifen	2
2.1	Eigenschaften von HT-Röhrchen-DMS	2
2.2	Betrachtungen zur Empfindlichkeit	6
2.2.1	Einfluss der Anzahl der Schweißpunkte	6
2.2.2	Einfluss des Abstandes der Schweißpunkte vom DMS-Röhrchen	7
3	Metallographische Untersuchungen	9
3.1	Vorbereitung der Probekörper	9
3.2	Metallographische Schliffe	10
3.3	Abreißproben	14
3.4	Zusammenfassung	15
4	FEM-Simulation	16
4.1	Modellierung der mechanischen Aufgabenstellung	16
4.1.1	Symmetrierandbedingungen	16
4.1.2	Möglichkeiten der Schweißpunktmodellierung	17
4.1.3	Modellierung des Kontaktes zum Bauteil	19
4.2	Berechnung realer Röhrchen-DMS	21
4.2.1	DMS-Varianten	21
4.2.2	Abstand der Schweißpunkte vom DMS-Röhrchen	22
4.2.3	Anzahl der Schweißpunkte in Messrichtung	26
4.2.4	Beliebige Anordnung der Schweißpunkte	29
4.3	Ausblick	31

1 Einleitung

1.1 Motivation

In der Messtechnik ist die Anwendung von Dehnungsmessstreifen (DMS) weit verbreitet. Die DMS werden dabei auch zunehmend bei hohen Temperaturen eingesetzt. Schon Messungen ab 120°C erfordern einen höheren Aufwand als Messungen im Raumtemperaturbereich. Die Hersteller bieten dazu verschiedene Hochtemperatur-Dehnungsmessstreifen (HT-DMS) an. Eine spezielle DMS-Form ist hierbei der anschweißbare, gekapselte Hochtemperatur-Röhrchen-Dehnungsmessstreifen (HT-Röhrchen-DMS). Bei der Applikation solcher HT-Röhrchen-DMS durch Punktschweißen kommt der Lage der Schweißpunkte hinsichtlich der Dehnungsübertragung eine besondere Bedeutung zu.

1.2 Aufgabenstellung

In dieser Arbeit soll bei anschweißbaren HT-Röhrchen-DMS der Einfluss der Schweißpunkte hinsichtlich der Dehnungsübertragung geprüft werden. Zu bearbeitende Teilaufgaben sind:

- Herausstellung der Eigenschaften von HT-Röhrchen-DMS ,
- Metallographische Untersuchung so genannter Mikroschweißpunkte auf Form und Lage, sowie
- Berechnung des Einflusses ausgewählter Schweißpunktverteilungen an 2 verschieden DMS Typen mittels FEM-Simulation.

2 Hochtemperatur-Röhrchen-Dehnungsmessstreifen

2.1 Eigenschaften von HT-Röhrchen-DMS

Mit Hochtemperatur-Dehnungsmessstreifen (HT-DMS) können sowohl statische, als auch dynamische Messungen bis zu 900°C durchgeführt werden.

Die HT-Röhrchen-DMS sind dadurch gekennzeichnet, dass für den Träger metallisches Material (vorwiegend Inconel) verwendet wird. In dem Röhrchen befindet sich der aktive Sensordraht, eingepresst in isolierendes Pulver aus MgO. Der DMS ist dadurch bei hohen Temperaturen beständig und zusätzlich vor anderen Umgebungseinflüssen geschützt. Bild 1 zeigt den Aufbau eines Viertelbrücken-HT-Röhrchen-DMS, welcher für dynamische Messungen geeignet ist.

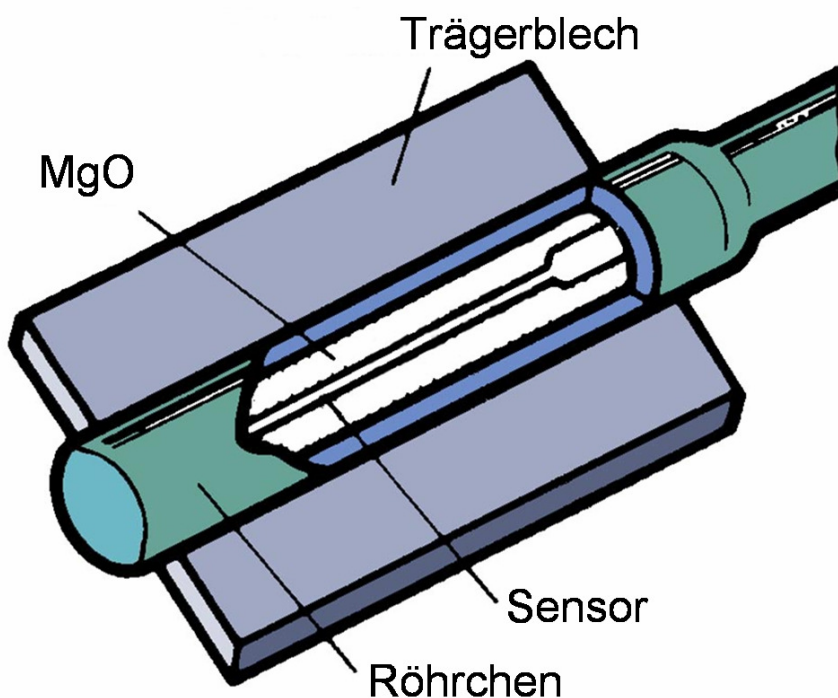


Bild 1: Gekapselter Hochtemperatur-Röhrchen-DMS

Der HT-Röhrchen-DMS wird durch Punktschweißen am zu untersuchenden Bauteil installiert. Dies ist eine schnelle Methode den DMS aufzubringen, denn im Vergleich zu angeklebten DMS entfällt hier die Aushärtezeit des Klebers. Das Trägerblech wird dabei mit zwei Schweißpunktzeilen auf dem Bauteil befestigt. Oft geben die Hersteller in mitgelieferten DMS-Unterlagen Empfehlungen, wie die Schweißpunkte zu setzen sind. Bild 2 zeigt beispielhaft (a) die Empfehlung eines DMS-Herstellers und (b) die Empfehlung der VDI-Richtlinie 2635 [1].

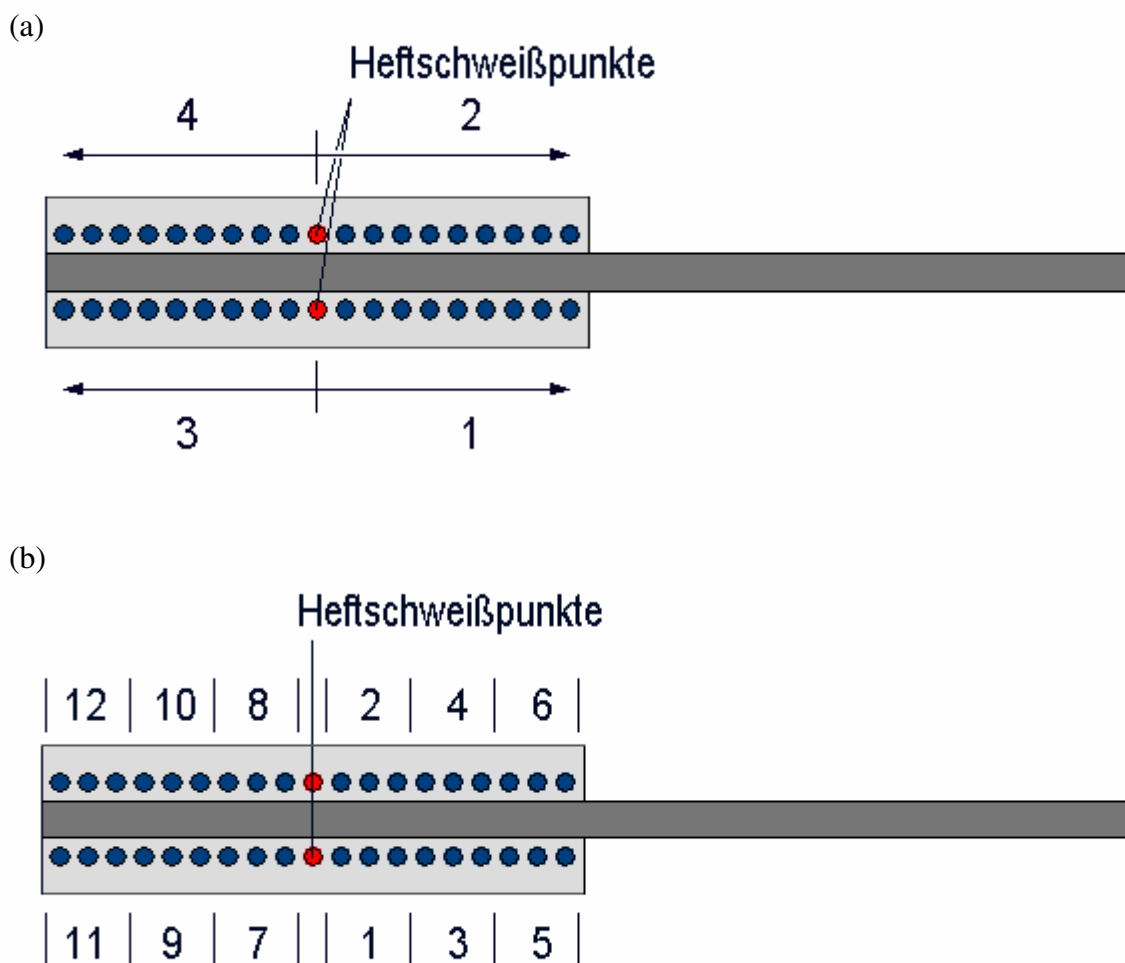


Bild 2: Vorgehensweise, die bei der Befestigung eines Röhrchen-DMS empfohlen wird:

(a) vom DMS-Hersteller

(b) von der VDI-Richtlinie 2635

Als Temperaturgang bezeichnet man die Temperaturabhängigkeit des Nullpunktes ohne Einwirken einer Belastung. Dieser entsteht durch unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten $\alpha_{Bauteil}^{th}$ des Bauteils und α_{DMS}^{th} des DMS und der temperaturabhängigen Widerstandsänderung des Messdrahtes α_R^{th} . Nach [2] ergibt sich dann die gemessene Widerstandsänderung $\frac{\Delta R}{R}$ zu:

$$\frac{\Delta R}{R} = \alpha_R^{th} \cdot \Delta T + k(\alpha_{Bauteil}^{th} - \alpha_{DMS}^{th}) \cdot \Delta T \quad (1)$$

Die Kenntnis des Temperaturgangs ist notwendig, um aus der gemessenen Widerstandsänderung die mechanische Dehnung zu errechnen. Durch geeignete Wahl der Legierungsbestandteile des Sensordrahtes kann der Temperaturgang so beeinflusst werden, dass für bestimmte Temperaturbereiche keine großen Schwankungen im Ausgangssignal auftreten. Die Fehler, die sonst bei der Umrechnung entstehen könnten, werden auf diese Weise minimiert. Bild 3 zeigt den Temperaturgang eines Viertelbrücken-Hochtemperatur-DMS aus NiCr, der für den Temperaturbereich 700-850 °C eingestellt ist.

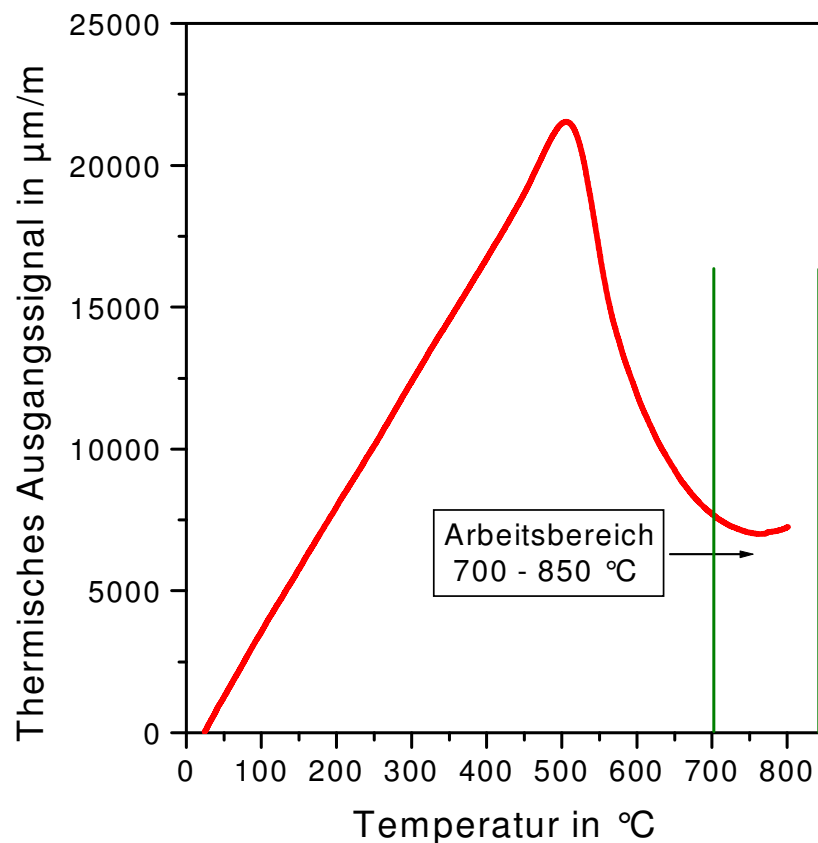


Bild 3: Temperaturgang eines Viertelbrücken-DMS

Der Nullpunkt eines HT-DMS ändert sich mit der Zeit auch beim Durchlaufen mehrerer Temperaturzyklen. Dieser Vorgang wird Nullpunktdrift genannt und nachfolgend nach [3] an einem frei aufgehängten Konstantendraht beschrieben.

Die scheinbare Dehnung eines frei aufgehängten Konstantendrahtes von 0,02 mm Durchmesser bei verschiedenen Temperaturzyklen in verschiedenen Medien ist in Bild 4 dargestellt. Ausgehend von Punkt 1, erkennt man beim Versuch in Argon Schleifen (durchgezogene Linie). Die Schleifen stabilisieren sich mit wachsender Anzahl der Temperaturzyklen, bis sie schließlich einen vermuteten Grenzwert G erreichen. Der Grund ist eine metallurgische Änderung im Draht, die nach jeweiliger Stabilisierung etwa ab 350°C erneut auftritt. Der gleiche Versuch in Luft ergibt eine positive Drift (gestrichelte Kurve), bei der offenbar Einflüsse der Korrosion des Drahtes dessen metallurgische Änderungen überdecken. Entsprechend der Korrosion lässt sich hier kein Grenzwert feststellen.

Bei HT-Röhrchen-DMS ist der Sensordraht hermetisch gekapselt, so dass keine Interaktion mit der Atmosphäre möglich ist.

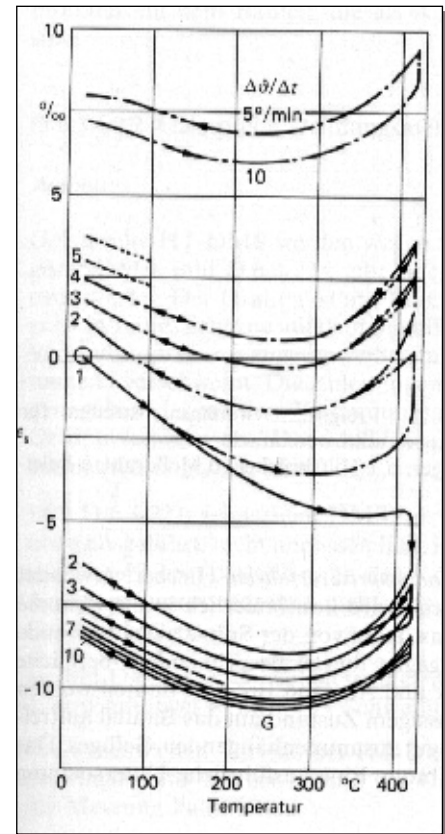


Bild 4: Nullpunktdrift eines freien Konstantendrahtes in Luft und Argon nach [3; S.513]

Neben Temperaturgang und Nullpunktdrift ist der k-Faktor eine weitere temperaturabhängige Größe. Es ist wichtig auch diesen Verlauf zu kennen, denn mit Hilfe des k-Faktors wird aus der gemessenen Widerstandsänderung die Dehnung berechnet.

Der k-Faktor liegt bei Raumtemperatur (abhängig vom Material des Widerstandsdrahtes bzw. der Widerstandsfolie) bei ca. 2,0. Mit steigender Temperatur nimmt der k-Faktor eines HT-Röhrchen-DMS ab. Bild 5 zeigt nach [4] die Auswertung eines Versuches bei dem dieser Zusammenhang für den Halbbrücken-HT-DMS KHCM von KYOWA überprüft wurde. Der gemessene Verlauf stimmt hierbei relativ gut mit der Herstellerangabe überein.

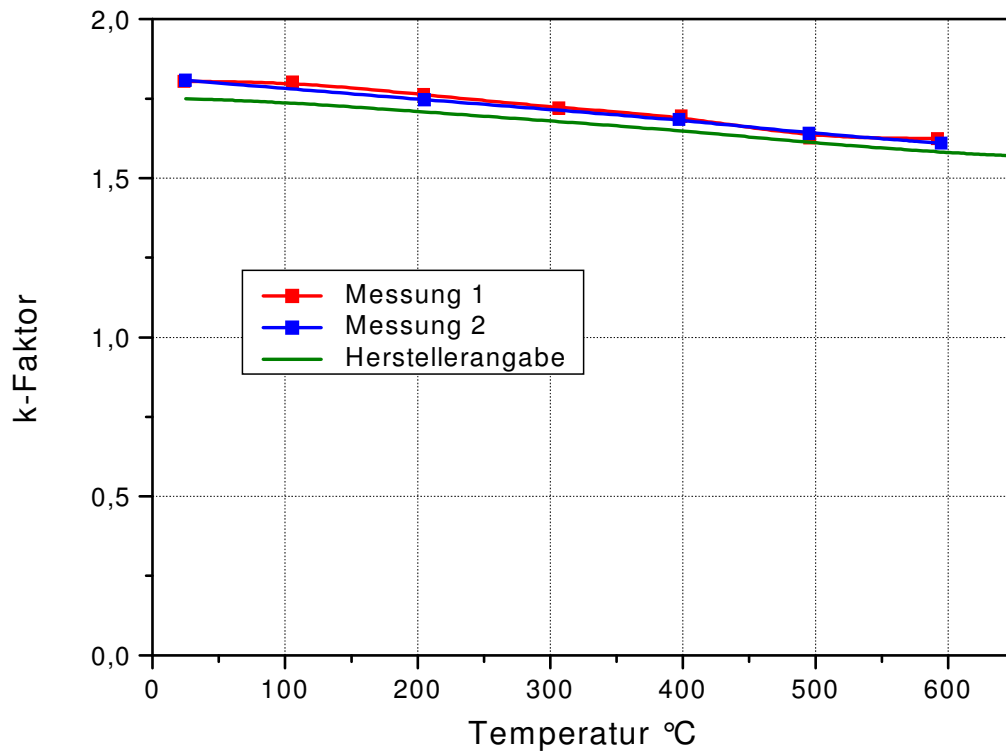


Bild 5: Temperaturabhängigkeit des k-Faktors des Halbbrücken-HT-DMS KHCM von KYOWA [4]

In dieser Arbeit soll jedoch nicht auf die temperaturabhängigen Eigenschaften mit ihren Einwirkungen auf die Messung eingegangen werden, sondern es soll vielmehr der Einfluss, der speziellen Applikation, auf die Dehnungsempfindlichkeit des DMS untersucht werden.

2.2 Betrachtungen zur Empfindlichkeit

Bei Folien-DMS liegt der Übertragungsfaktor stets bei weit über 90%. Damit spielt hier eine Änderung der Dehnungsübertragung infolge von zum Beispiel schlechter Klebung eine untergeordnete Rolle. Anders bei HT-Röhrchen-DMS, hier spielt die Präparation eine ganz entscheidende Rolle. Denn schon ein kleiner Präparationsfehler kann zu gravierenden Änderungen der Dehnungsübertragung führen und den Übertragungsfaktor sogar bis auf 50% herabsetzen.

2.2.1 Einfluss der Anzahl der Schweißpunkte

Die HT-Röhrchen-DMS werden durch Punktschweißen mit dem Bauteil verbunden. Dabei wird die Anzahl der Schweißpunkte maßgeblich durch den Abstand der Schweißpunkte zueinander bestimmt. Die Hersteller empfehlen, die Schweißpunkte in einem Abstand von 0,8 mm aufzubringen (Mitte zu Mitte). Voraussetzung hierfür ist eine Schweißelektrode mit

einem entsprechenden Durchmesser sowie der Einsatz eines Schweißgerätes, das eine optimale Einstellung der Schweißenergie (möglichst stufenlos) gestattet.

Mit abnehmender Anzahl der Schweißpunkte ist mit einer Verringerung der Empfindlichkeit der DMS zu rechnen. Bild 6 zeigt die prozentuale Abnahme der Messempfindlichkeit in Abhängigkeit vom Abstand der Schweißpunkte zueinander. Diese Empfindlichkeitsverringern ist bei DMS mit kurzer Messbasis (AWH-8) weitaus gravierender als bei DMS mit längerer Messbasis (AWH-16).

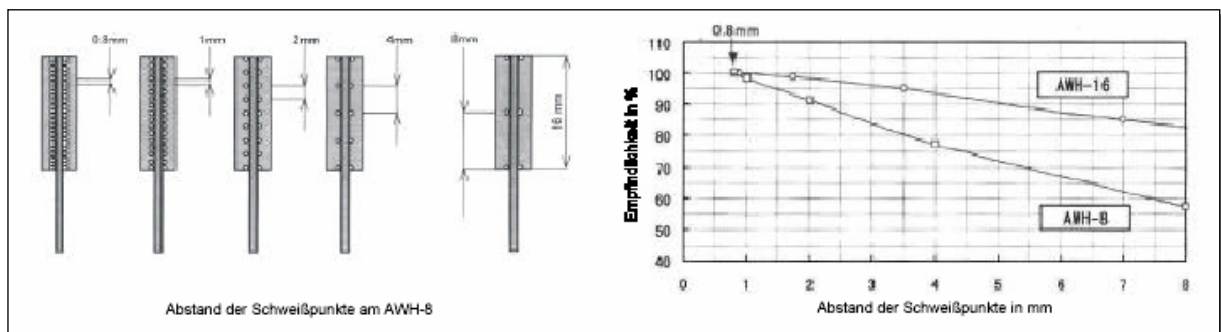


Bild 6: Abstand der Schweißpunkte [5; S.2]

2.2.2 Einfluss des Abstandes der Schweißpunkte vom DMS-Röhrchen

Generell ist es notwendig, die Schweißpunkte in einer Reihe so dicht wie möglich am DMS-Röhrchen zu platzieren. Wie schon unter Punkt 2.2.1 genannt, sind auch hierfür wieder der Durchmesser der Schweißelektrode sowie die Art des Schweißgerätes von entscheidender Bedeutung. Bei TML in Japan durchgeführte Tests haben ergeben, dass mit zunehmendem Abstand der Schweißpunkte vom DMS-Röhrchen ebenfalls eine Verringerung der Messempfindlichkeit eintritt. Hierzu wurde die Empfindlichkeit von mehreren DMS des Typs AWH bei unterschiedlicher Entfernung der Schweißpunkte von DMS-Röhrchen mit der Empfindlichkeit von geklebten Folien-DMS des Typs FLA-6-11 verglichen (siehe Bild 7).

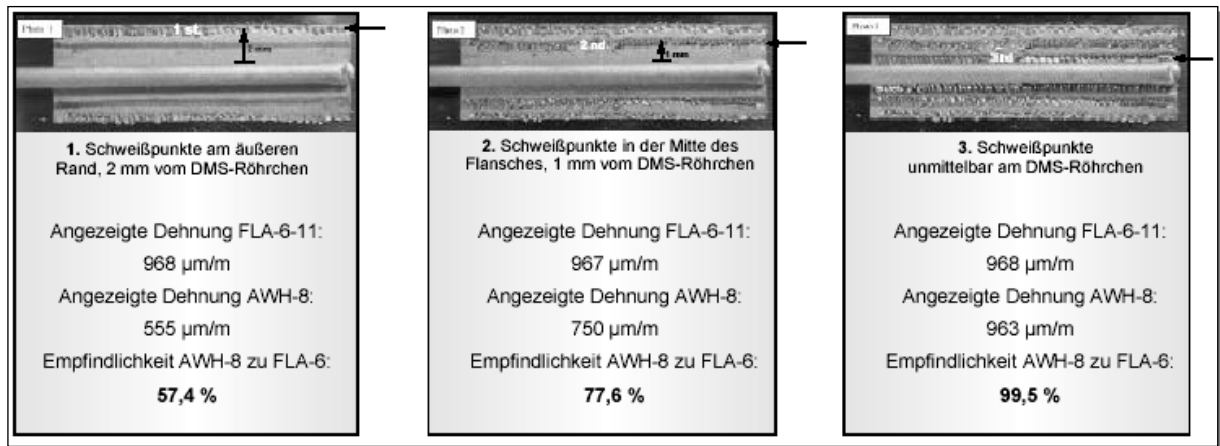


Bild 7: Abstand der Schweißpunkte vom DMS-Röhrchen [5; S.2]

3 Metallographische Untersuchungen

3.1 Vorbereitung der Probekörper

Um Mikroschweißpunkte metallographisch untersuchen zu können, wurden Probeschweißungen angefertigt. Anstelle von HT-Röhrchen-DMS wurden Metallblechstreifen von 0,1 mm Dicke auf den Probekörper aufgeschweißt. Diese Blechstreifen sind für die Untersuchung von einem Hersteller bereitgestellt worden und entsprechen dem Trägermaterial des DMS.

Zum Anschweißen wurde das Handpunktschweißgerät von KYOWA verwendet, welches in Bild 8 dargestellt ist. Es bietet eine stufenlose Schweißenergieeinstellung. Außerdem kann der Anpressdruck der Elektrode manuell verändert werden. Die Elektrode hat einen Durchmesser von 0,8 mm.

Für die Untersuchungen wurden Proben mit 4 unterschiedlichen aber typischen Schweißereinstellungen hergestellt. Es wurde jeweils eine Anschleifprobe (A) sowie eine Abreißprobe (B) angefertigt. In Tabelle 1 sind alle Proben mit ihren Schweißereinstellungen erfasst.



Bild 8: Handpunktschweißgerät [6; S.58]

Probennummer	Einstellungen		
	Fine	Coarse	Kraft
F 10 P 1 A	1,0	Low	10 N
F 10 P 1 B	1,0	Low	10 N
F 10 P 2 A	1,0	Low	20 N
F 10 P 2 B	1,0	Low	20 N
F 20 P 1 A	2,0	Low	10 N
F 20 P 1 B	2,0	Low	10 N
F 50 P 1 A	5,0	Low	10 N
F 50 P 1 B	5,0	Low	10 N

Tabelle 1: Schweißereinstellungen der angefertigten Proben

3.2 Metallographische Schliffe

Die Hälfte der angefertigten Probeschweißungen (Bezeichnung endet mit A) wurden für die Untersuchung längs angeschliffen und poliert. Damit dabei keine unerwünschten Abrisse oder Verformungen auftreten, wurden die Proben zuvor in Kunstharz eingebettet. Um außerdem die verschiedenen Materialien und die Wärmeeinflusszone sichtbar zu machen, sind die Oberflächen zusätzlich angeätzt worden.

In Bild 9 ist der Metallblechstreifen (hell) deutlich vom Probekörper aus 42CrMo4 (dunkel) zu unterscheiden. Außerdem sind die Wärmeeinflusszone und die Schweißlinse zu erkennen. Während der Durchmesser der Schweißlinse schlecht sichtbar ist, kann die Tiefe in das Bauteil gut bestimmt werden. An sehr dünnen Bauteilen oder an Bauteilen mit besonderen Oberflächeneigenschaften kann sich unter Umständen der Tiefeneinfluss der Schweißverbindung negativ auf die Bauteilfestigkeit auswirken. Dies muss bei der Verwendung von anschweißbaren HT-Röhrchen-DMS immer bedacht werden!

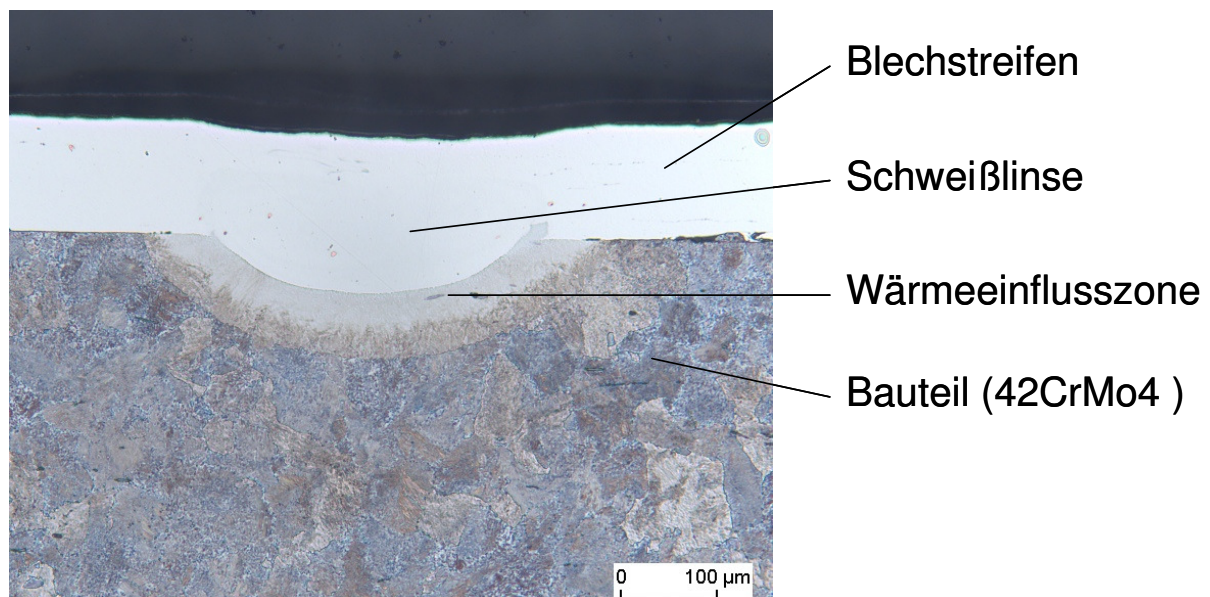
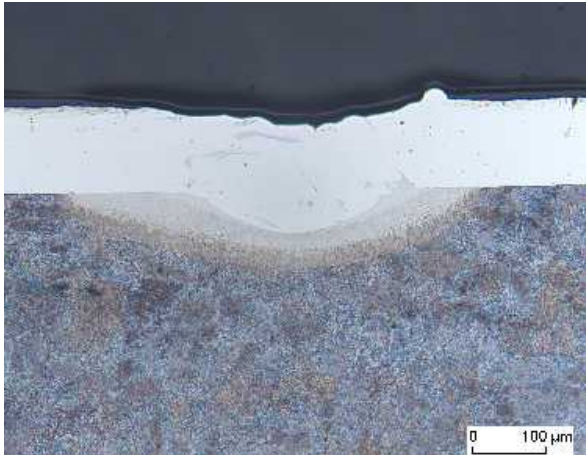


Bild 9: Anschliff eines Mikroschweißpunktes

In Tabelle 2 sind einige ausgewählte Schweißpunkte verschiedener Schliffe näher beschrieben. Bei den Aufnahmen ist jeweils eine Vergrößerung von 100:1 verwendet worden.

Bemerkung: Um gesicherte Aussagen über auftretende Erscheinungen treffen zu können, müssten weitere Untersuchungen mit mehreren Proben durchgeführt werden.

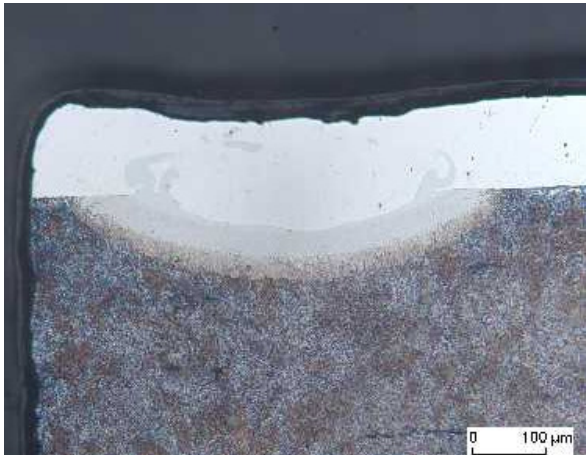
Tabelle 2: Auswertung der metallographischen Schliffe



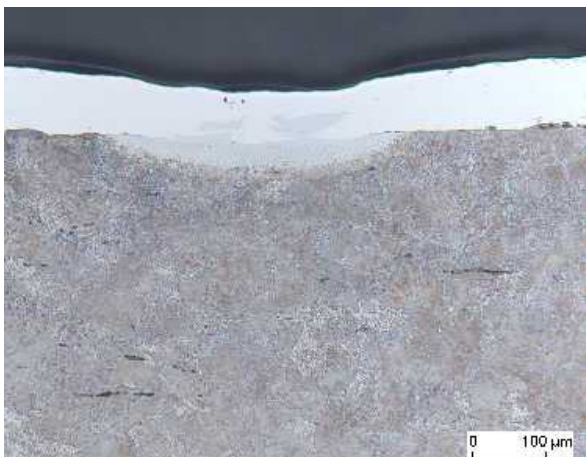
Probe: F 10 P 1 A

Der helle Metallblechstreifen mit einer Dicke von 100 µm wird über dem Schweißpunkt in seiner Dicke leicht reduziert.

Der Durchmesser der Schweißlinse beträgt etwa 300 µm.

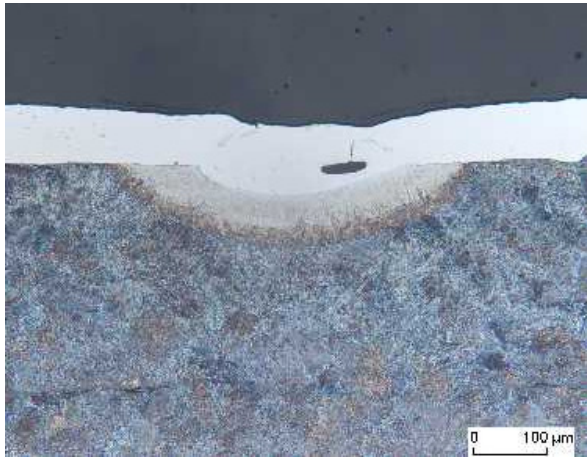


Probe: F 10 P 1 A



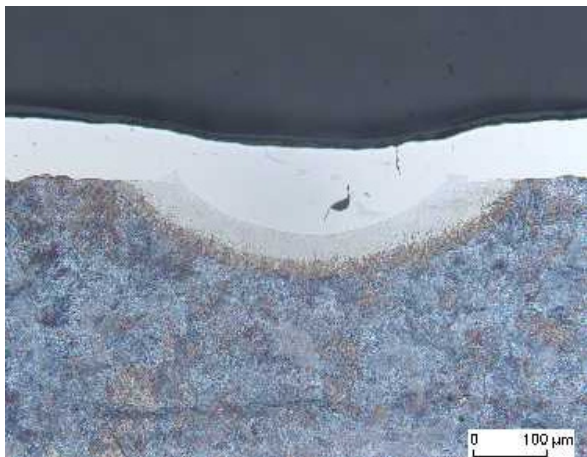
Probe: F 10 P 2 A

Obwohl hier der Anpressdruck erhöht wurde, ist nur eine geringe Schmelzzone entstanden.



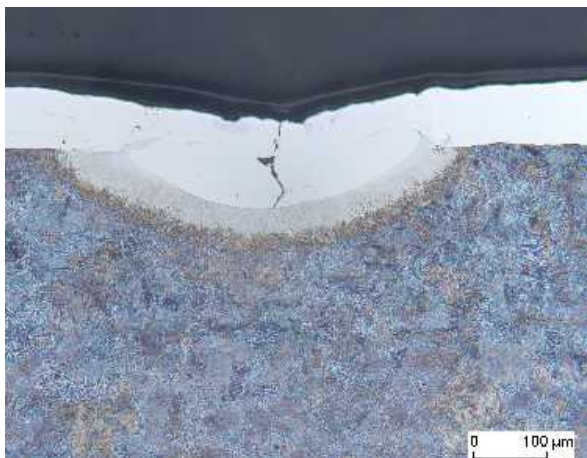
Probe: F 20 P 1 A

Diese SchweißEinstellung verursachte die meisten Schweißfehler. Viele Einschlüsse und Risse sind in dieser und den nächsten, dazugehörigen Bildern erkennbar.

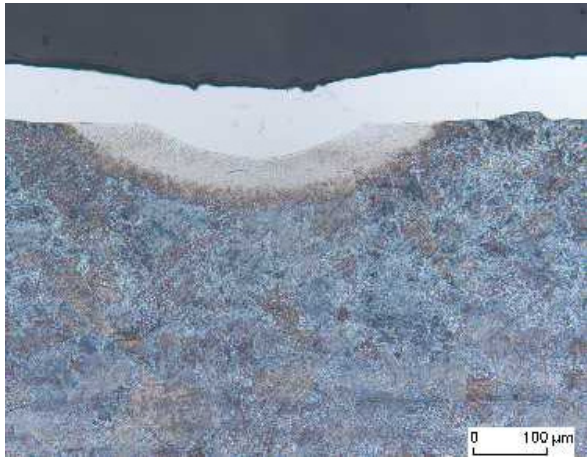


Probe: F 20 P 1 A

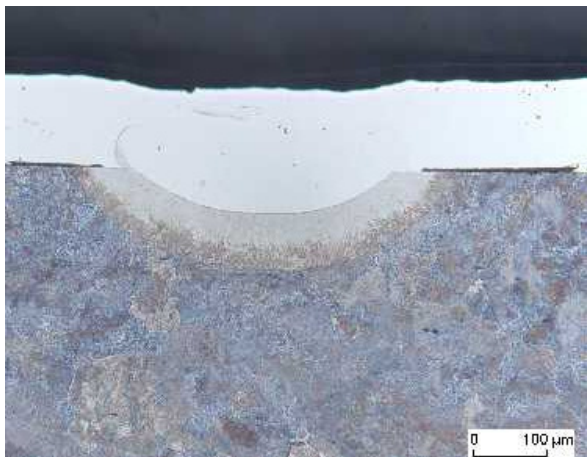
Eine Zunahme des Tiefeneinflusses ist mit der Erhöhung der Schweißenergie zu erklären.



Probe: F 20 P 1 A

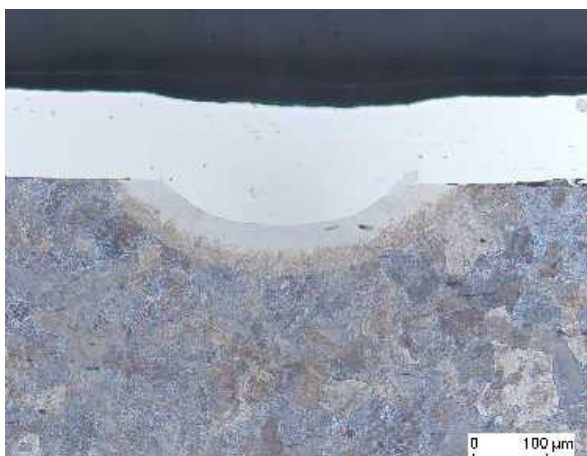


Probe: F 20 P 1 A



Probe: F 50 P 1 A

Tiefe der Wärmeeinflusszone nimmt bei Erhöhung der Schweißenergie weiter zu.



Probe: F 50 P 1 A

3.3 Abreißproben

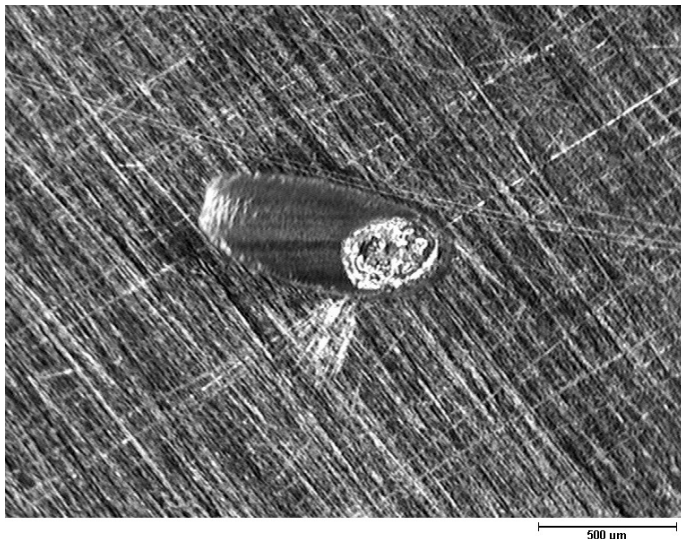
An der anderen Hälfte der Probeschweißungen (Bezeichnung endet mit B) wurden die Metallblechstreifen von Hand abgerissen, um die Festigkeit der Verbindung qualitativ zu prüfen, sowie die Verbindungsfläche zwischen Streifen und Probe sichtbar zu machen und auszumessen.

Bei diesen Aufnahmen beträgt die Vergrößerung von 40:1.



Die Schweißpunktverbindungsflächen sind nicht exakt rund. Dies liegt daran, dass bei der Schweißpunkterzeugung von Hand die Elektrode nicht genau senkrecht zum Blech gehalten wird.

Bild 10: Abreißprobe F10P1B



Das Bild zeigt, dass ein Rest des Metallblechstreifens nach dem Abreißen fest an der Probe verbleibt.

Das Ausmessen wird dadurch zwar schwieriger, dafür vermittelt dieser Sachverhalt, dass der Blechstreifen gut mit der Probe verbunden ist.

Bild 11: Abreißprobe F10P2B

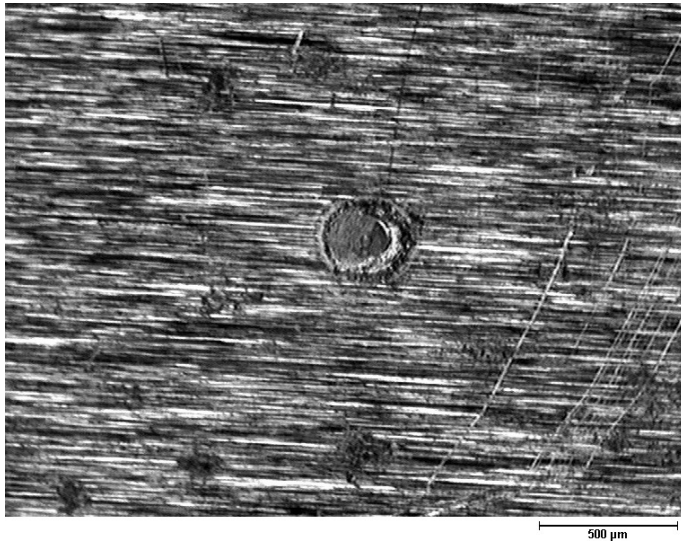


Bild 12: Abreißprobe F20P1B

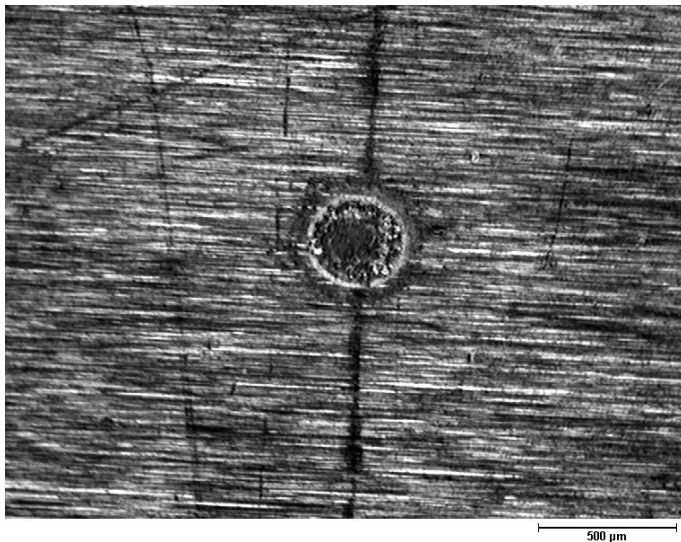


Bild 13: Abreißprobe F50P1B

Die größte hier verwendete Schweißenergie führt auch zur größten Schweißlinsenfläche.

Die hohe Rauigkeit in dem Schweißpunkt lässt hier auf ein starkes Aufschmelzen im Bauteil schließen.

3.4 Zusammenfassung

Aus den interessanten, metallographischen Aufnahmen lässt sich eine gute und sichere Verbindung an den Mikroschweißpunkten feststellen. Da Unterschiede nur im hundertstel Millimeterbereich auftreten, reicht an dieser Stelle die Aussage, dass der Durchmesser der Mikroschweißpunktverbindungen bei einer 0,8 mm Elektrode in der Größenordnung um circa 300 µm liegt. Für weitergehende Aussagen müssten weitere, werkstofftechnische Untersuchungen durchgeführt werden.

4 FEM-Simulation

4.1 Modellierung der mechanischen Aufgabenstellung

Das Ziel der Modellierung besteht darin, den komplizierten Aufbau eines präparierten HT-Röhrchen-DMS als FE-Modell abzubilden. Dabei sind sowohl beim inneren Aufbau, als auch bei der Ausbildung der Schweißpunkte erhebliche Vereinfachungen erforderlich.

4.1.1 Symmetrierandbedingungen

Ausgangspunkt für die Modellierung ist die Vereinfachung der Geometrie des DMS. So wird der Messdraht über die gesamte Länge modelliert, obwohl die aktive Messlänge nur halb so lang wie der DMS ist. Die Umkehrschleufe modelliert man demnach nicht mit. Der dabei entstehende Fehler wird vernachlässigt, da der Messdraht aufgrund seiner Querschnittsabmessung das Ergebnis nur unwesentlich beeinflusst. In der Auswertung darf dann allerdings nur die aktive Messlänge betrachtet werden, nicht der gesamte modellierte Draht.

In dem Bild 14 wird deutlich, dass das Modell doppelsymmetrisch ist. Für die Berechnung wird deshalb ein Viertelmodell erstellt. Dies entspricht dem rot dargestellten Teil des DMS.

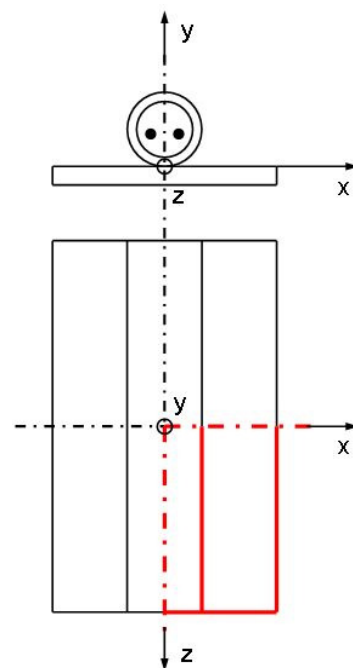


Bild 14: Doppelsymmetrie des Modells (Skizze)

Das Viertelmodell ist in Bild 15 in 3-dimensionaler Ansicht dargestellt. Die x,y-Ebene sowie die y,z-Ebene sind die Symmetrieebenen, an welchen die entsprechenden Randbedingungen festgelegt werden.

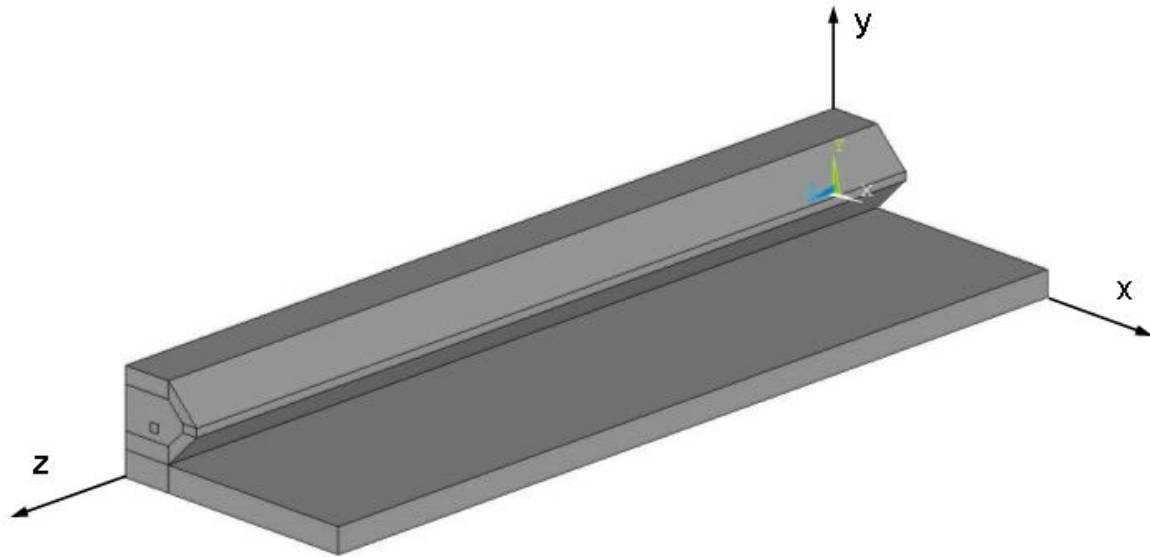


Bild 15: Viertelmodell des HT-DMS

Es werden aus oben genannten Gründen folgende Symmetrierandbedingungen festgelegt:

- x, y - Ebene: $u_z = 0$

- y, z - Ebene: $u_x = 0$

4.1.2 Möglichkeiten der Schweißpunktmodellierung

Da nicht die Eigenschaft eines einzelnen Schweißpunktes, sondern der Einfluss der Position der Schweißpunkte auf die Dehnungsübertragung untersucht wird, ist es bei der Modellierung der Schweißpunkte ausreichend an den entsprechenden Knoten die Verschiebungsrandbedingungen zu vergeben. Dies ist zum einen die Verschiebung in y – Richtung und zum anderen die Verschiebung in z – Richtung.

- $u_y = 0$

- $u_z \neq 0$

Das Blockieren der Verschiebung in y - Richtung stellt den festen Kontakt zur Bauteil dar. Der DMS darf sich in den Schweißpunkten nicht vom Bauteil abheben.

Die Verschiebung in z - Richtung ist ungleich Null, da mit Hilfe dieser Randbedingung die Dehnung, in Abhängigkeit von den Schweißpunktkoordinaten, auf den DMS aufgebracht wird. Der Wert für die Verschiebung ergibt sich nach folgender Formel:

$$u_z = u \cdot \varepsilon \quad (2)$$

In den späteren Untersuchungen wird mit $\varepsilon = 10^{-3}$ als Referenzdehnung gearbeitet.

Nun können zwei verschiedene Strategien verwendet werden, um auch tatsächlich die notwendigen Knoten an den Schweißpunktstellen zu erhalten.

Es wird ein regelmäßiges Netz („mapped mesh“) erzeugt. Danach werden die Schweißpunkte an Knoten im Netz definiert. Dabei ist es unbedingt erforderlich während der Vernetzung die Lage der Schweißpunkte zu berücksichtigen, damit an einer Schweißpunktstelle auch wirklich ein Knoten erzeugt wird!

So genannte „hard points“ werden an den entsprechenden Stellen der Schweißpunkte erzeugt. Bei einer nun folgenden automatischen Vernetzung werden in diesen „hard points“ automatisch Knoten generiert. An diesen wiederum die Knotenverschiebungsrandbedingungen angetragen werden können. Bei dieser Strategie ist eine Vernetzung nur möglich, wenn Tetraederelemente verwendet werden („free mesh“).

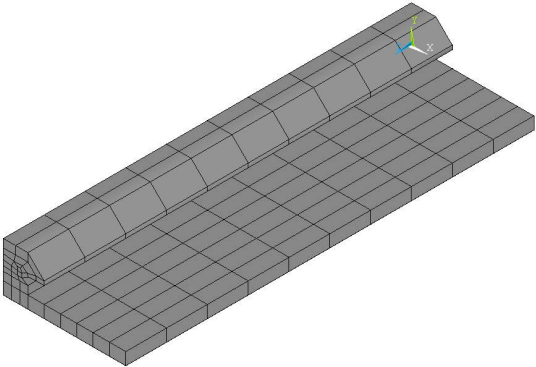
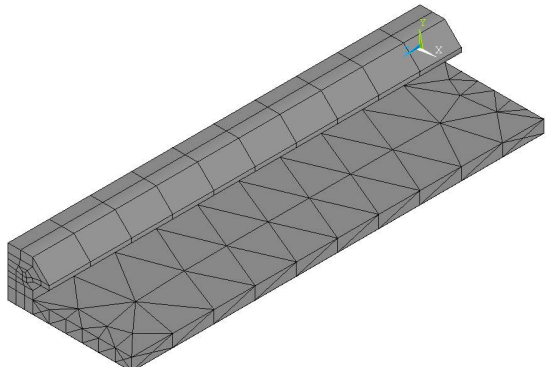
„mapped mesh“	„free mesh“
 <p data-bbox="185 1406 742 1496"> + Netz ist einfach zu erzeugen - Schweißpunktverteilung ist netzabhängig </p>	 <p data-bbox="826 1406 1209 1554"> + Schweißpunktverteilung ist netzunabhängig - höhere Rechenzeit </p>

Tabelle 3: Vergleich regelmäßige und freie Vernetzung

Die freie Vernetzung wird nur bei der Untersuchung mit weitgehend beliebiger Schweißpunktverteilung eingesetzt. Für alle anderen Untersuchungen wird eine regelmäßige Vernetzung bevorzugt.

4.1.3 Modellierung des Kontaktes zum Bauteil

Bei der Modellierung des Kontaktes des HT-DMS zum Bauteil ist zu berücksichtigen, dass sich der DMS an den Stellen, an denen sich keine Schweißpunkte befinden vom Bauteil abheben kann, eine Durchdringung des Bauteils aber ausgeschlossen werden muss. Dies wird bei der FE-Simulation durch die Definition einer Kontaktfläche erreicht. Bild 16 zeigt die Verformung des DMS-Modells ohne Modellierung von Kontaktelementen. Die Stelle an welcher die Randbedingungen für die Schweißpunkte modelliert sind ist durch den roten Pfeil gekennzeichnet. Es findet eine deutliche Verformung statt. Die rote Linie symbolisiert die Unterseite des unverformten DMS. Dadurch wird erkennbar, dass der DMS teilweise vom Bauteil abhebt, und das Bauteil auch teilweise durchdringt.

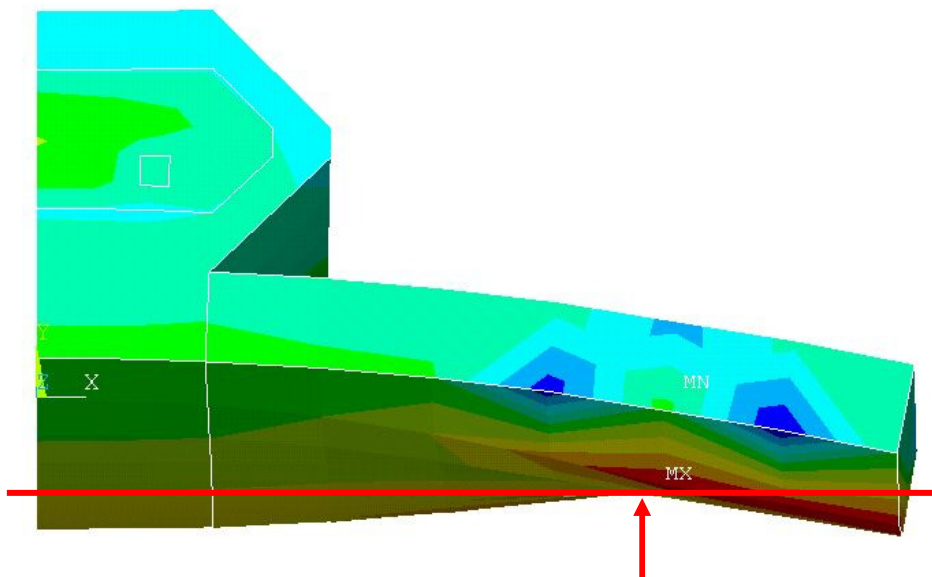


Bild 16: Verformung des DMS ohne Kontaktelemente

Da eine solche Durchdringung in der Realität nicht vorkommt, ist es nötig den entsprechenden Kontakt zum Bauteil an der DMS-Unterseite zu modellieren. ANSYS bietet hierzu die Möglichkeit „surface-to-surface-contact“ zu definieren.

Es wird eine zusätzliche Fläche erzeugt, welche der Oberfläche des zu untersuchenden Bauteils entspricht. Die DMS-Unterseite wird als Kontaktfläche, und die neue Fläche als unverformbare Zielfläche definiert. Vereinfachend wird hierbei vorausgesetzt, dass der DMS nicht auf das Bauteil rückwirkt. Der Probekörper ist im Vergleich zum DMS starr.

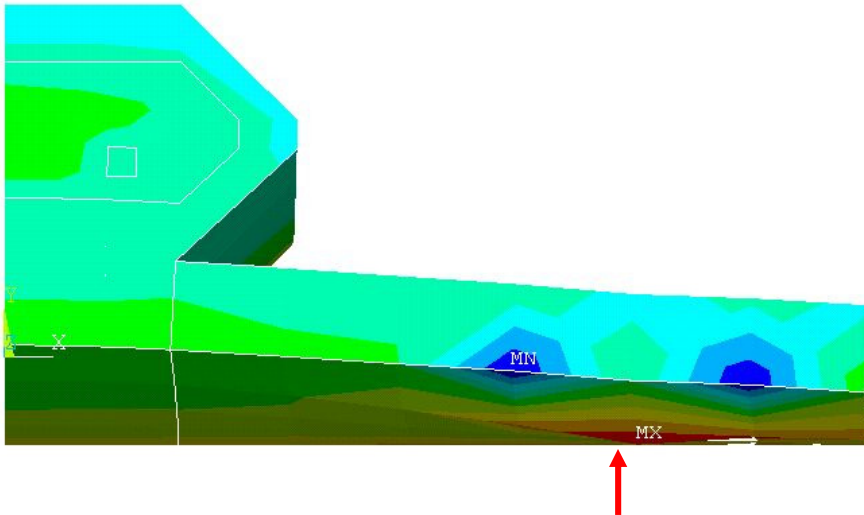


Bild 17: Verformung des DMS mit Kontaktelementen

Bild 17 zeigt nun die Verformung des DMS mit Kontaktflächen. Die Randbedingungen für die Schweißpunkte sind hier ebenfalls durch einen roten Pfeil dargestellt und entsprechen denselben Randbedingungen wie in Bild 16.

Bei dieser Modellierung wird es nur Kontakt zwischen den Flächen geben, wenn Durchdringung verhindert werden muss. Ein Abheben des DMS ist möglich.

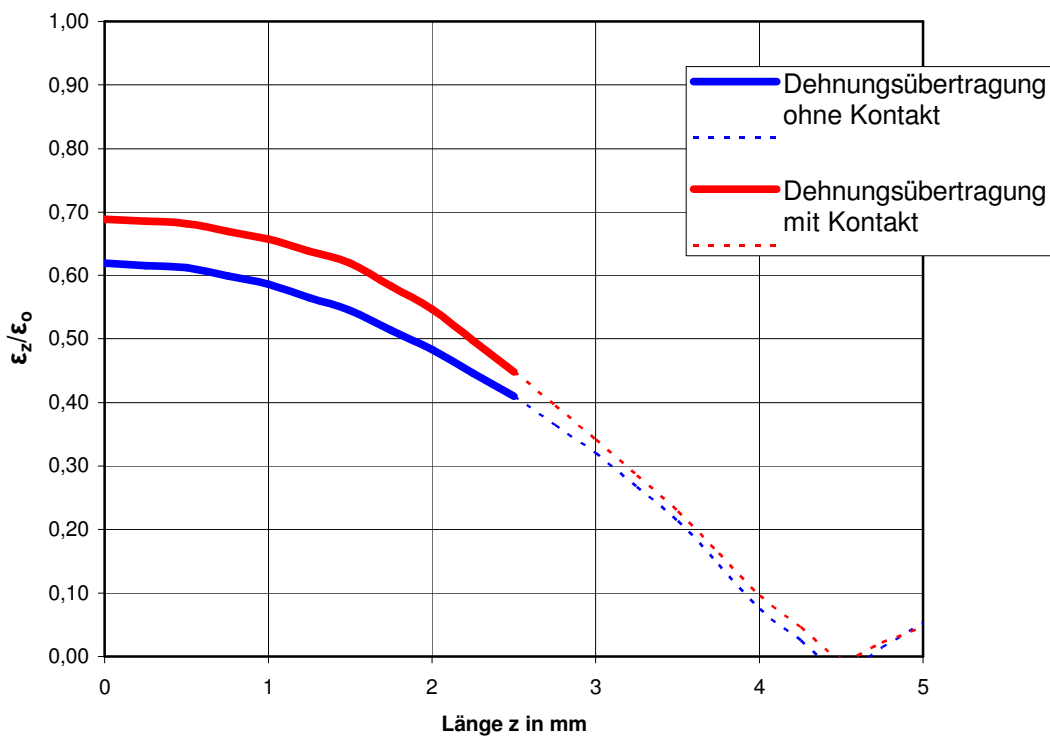


Bild 18: Vergleich der Dehnungsübertragung mit und ohne Kontakt

Das Diagramm in Bild 18 zeigt für die beiden Modelle die Dehnungsübertragung von den Schweißpunkten in den Messdraht. Wobei ε_z die gemessene Dehnung in Messrichtung und ε_0 die vorgegebene Referenzdehnung ist. Die durchgezogene Linie entspricht der wirklichen, aktiven Sensorlänge des DMS. Die gestrichelte Linie ist die Dehnungsübertragung im modellierten Draht. Diese spielt bei der Auswertung keine Rolle, da es eine Modellvereinfachung ist.

Bei Betrachtung der Kurven stellt sich eine deutlich höhere Dehnungsübertragung bei dem Modell mit Kontaktflächen heraus. Da dieses Modell von der Vorstellung her den realen mechanischen Verhältnissen des DMS näher kommt, werden für die folgenden Untersuchungen ausschließlich Modelle mit Kontaktflächen verwendet.

4.2 Berechnung realer Röhren-DMS

4.2.1 DMS-Varianten

Für die Untersuchung werden zwei verschiedene HT-Röhren-DMS von KYOWA verwendet. Es handelt sich um die Typen KHCD und KHCM. Der Hersteller KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS CO. mit seinem Sitz in Japan gibt folgende Daten zu den beiden DMS an:

Die KHCD-Streifen wurden speziell für das Messen dynamischer Dehnungen bis zu Temperaturen von 800 °C entwickelt. Ihre kleinen Abmessungen (kleiner als alle anderen Röhren-DMS von KYOWA) ermöglichen die Installation auch unter engen Platzbedingungen. Das fest montierte besonders dünne 2 m lange MI-Kabel mit anschließendem 0,5 m langem flexiblen Kabel erleichtert die Handhabung. Die beiden Leiteradern des MI-Kabels bilden über die Lötstellen zum Messdraht ein Thermoelement, so dass mit den KHCD-Streifen auch Temperaturmessungen möglich sind. Der Anwendungstemperaturbereich reicht von Raumtemperatur bis 800 °C (bei <10 h bis 850 °C), wobei er zwischen 25 °C und 800 °C temperaturkompensiert ist.

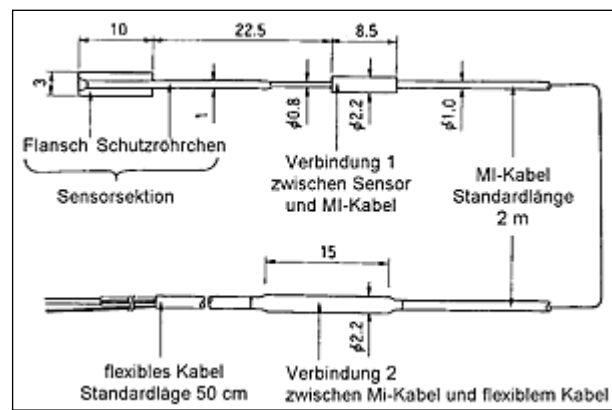


Bild 19: Abmessung des KHCD-5-200-G11 C2M [6]

Der anschweißbare Halbbrücken-DMS KHCM eignet sich für statische und dynamische Dehnungen bis 650 °C. Der Anwendungstemperaturbereich reicht von -196 °C bis 650 °C und ist zwischen 25 °C und 650 °C temperaturkompensiert. Das Röhren ist mit einem Trägerblech verschweißt, das durch Punktschweißen am Messobjekt befestigt wird. Die Anschlussdrähte münden in ein luftdicht am DMS montiertes dreiadriges MI-Kabel (standardmäßig 2 m lang), an das sich ein 0,5 m langes flexibles Kabel anschließt. Das Röhren, sein Befestigungsflansch sowie die Umhüllung des MI-Kabels bestehen aus Inconel 600.

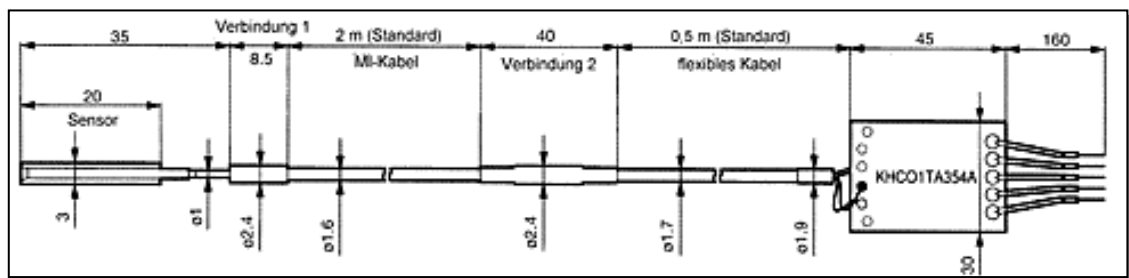


Bild 20: Abmessung des KHCM-10-120-G15-11 C2M [6]

Wesentliche Unterschiede zwischen den beiden Typen sind die Röhrenlänge und die Länge des Sensordrahtes. Bei der Modellierung des KHCM wird der Kompensationsdraht nicht mit modelliert. Tabelle 4 zeigt die wichtigsten Abmessungen noch einmal zusammengefasst.

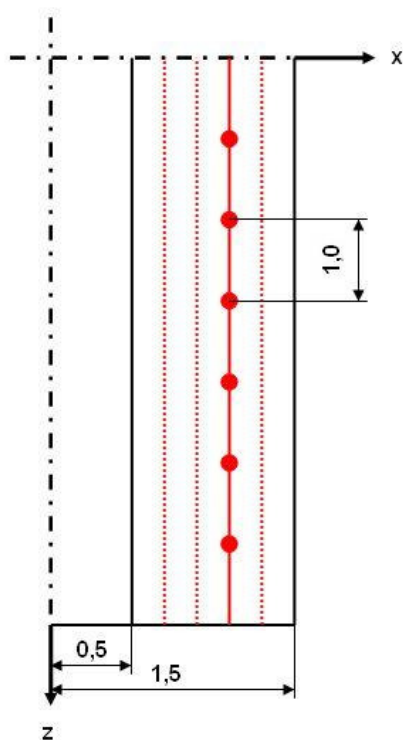
Bezeichnung	Trägerlänge l_0	Sensorklänge z_0
KHCD-5-200-G11 C2M	10 mm	5 mm
KHCM-10-120-G15-11 C2M	20 mm	10 mm

Tabelle 4: Abmessungen der beiden DMS-Typen

4.2.2 Abstand der Schweißpunkte vom DMS-Röhren

Der schon in Abschnitt 0 beschriebener Einfluss des Abstandes der Schweißpunkte vom DMS-Röhren wird in diesem Abschnitt mit Hilfe der FEM überprüft.

Dazu werden sowohl für den KHCD als auch für den KHCM jeweils 4 Rechnungen durchgeführt und miteinander verglichen. Bild 21 zeigt die Veränderung der Parameter auf. Die durchgezogene rote Linie stellt die Referenzvariante dar, da diese Lage der Schweißpunkte typisch für die Applikation von Hand ist. Der Abstand der Schweißpunkte zueinander (in z - Richtung) ist bei beiden DMS-Typen konstant mit 1 mm modelliert.



Abstand von DMS-Mitte x
0,7 mm
0,9 mm
1,1 mm
1,3 mm

Tabelle 5: Abstand von DMS-Mitte

Bild 21: Abstand des SP vom DMS-Röhrchen

Die obige Tabelle zeigt die für die Berechnung verwendeten Abstände. Es muss allerdings erwähnt werden, dass der Abstand von 0,7 mm in der Realität nicht hergestellt werden kann, da der Durchmesser der Schweißelektrode 0,8 mm ist. Diese würde bei der Applikation am Röhrchen anstoßen. Um aber die Tendenz dieser Parameterveränderung besser zeigen zu können, wird diese Einstellung mit simuliert.

In Bild 22 und Bild 23 sind die FEM-Berechnungen ausgewertet und graphisch dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit der beiden Diagramme wird die z-Koordinate über der Trägerlänge l_0 angegeben. Die Längsabmessung des KHCM ist doppelt so groß wie die des KHCD. Die Graphen beginnen, der mittleren Symmetrieebene des Modells entsprechend, bei 0 und enden, dem Ende der aktiven Sensorlänge entsprechend, in der Hälfte des Modells.

Es wird für die beiden DMS-Typen deutlich: je näher die Schweißpunkte an dem DMS-Röhrchen liegen, desto größer ist die Dehnungsübertragung vom Bauteil auf den DMS.

Ein Vergleich beider Diagramme untereinander führt zu dem Schluss, dass die Dehnungsübertragung vom KHCD wesentlich geringer ist als die des KHCM. Eine quantitative Gegenüberstellung erfolgt in Tabelle 6. Darin sind die maximalen Dehnungsübertragungen, sowie der arithmetische Mittelwert der Dehnungsübertragung für alle Rechnungen zusammengefasst.

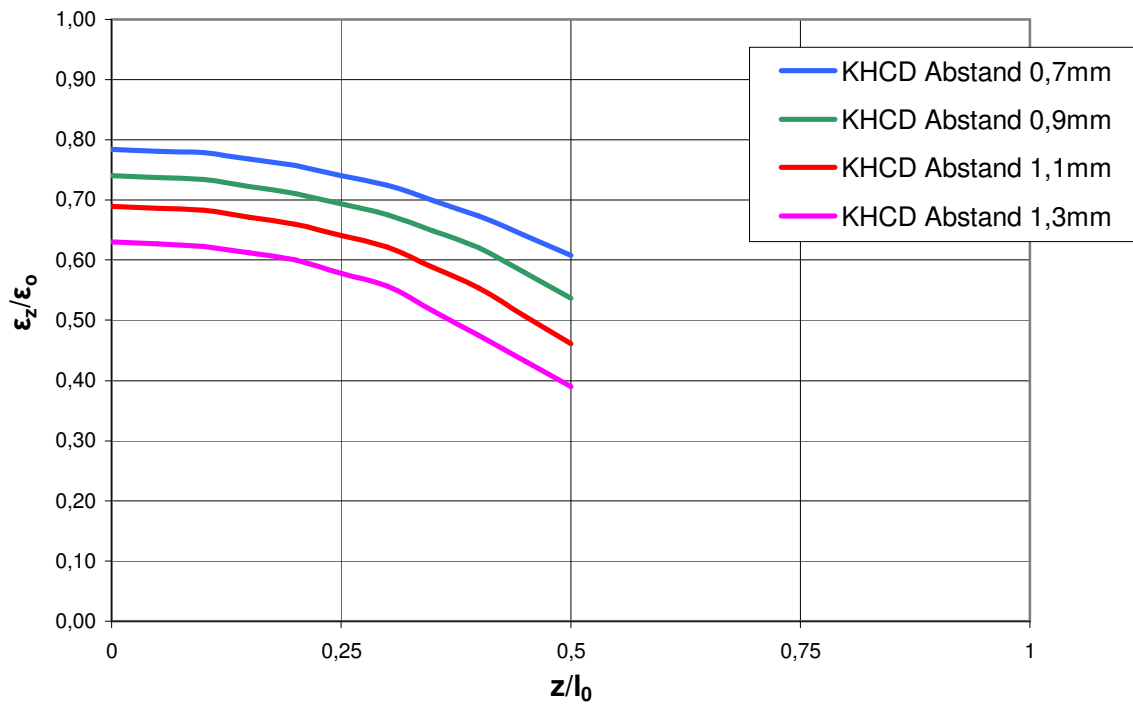


Bild 22: Diagramm KHCD - Abstand des Schweißpunktes vom DMS-Röhrchen

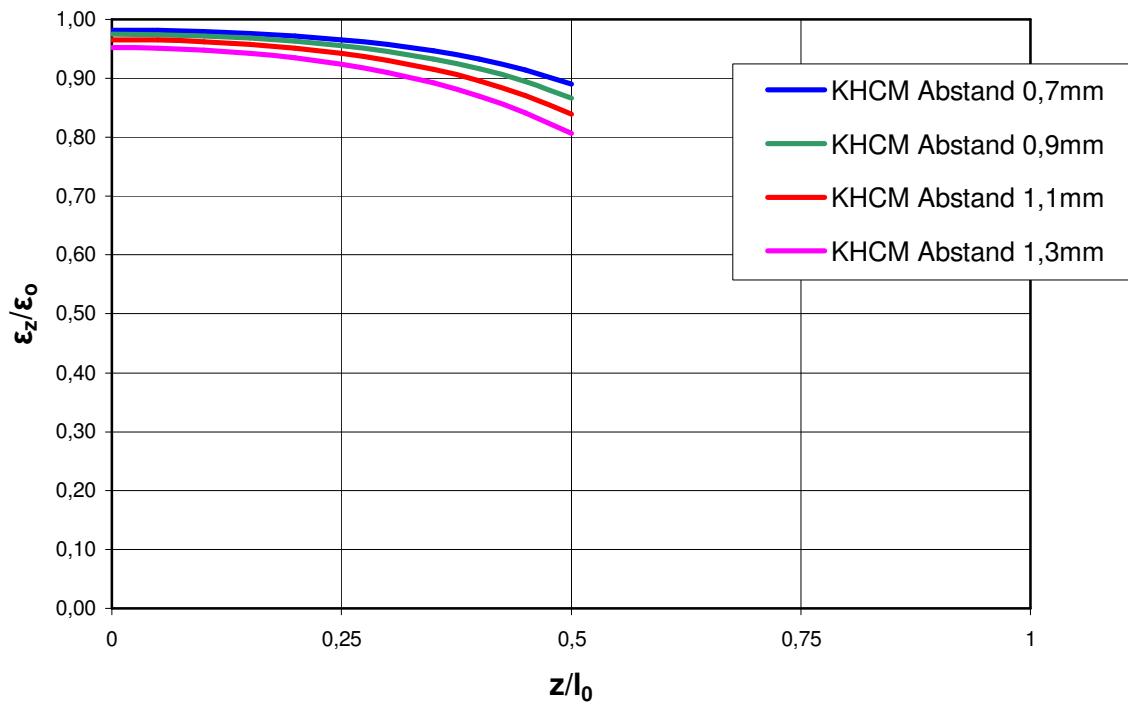


Bild 23: Diagramm KHCM - Abstand des Schweißpunktes vom DMS-Röhrchen

Name des Modells	maximale Dehnungsübertragung $\varepsilon_z/\varepsilon_0$ in [%]	durchschnittliche Dehnungsübertragung in [%]
KHCD Abstand 0,7mm	78,40	72,33
KHCD Abstand 0,9mm	74,02	67,27
KHCD Abstand 1,1mm	69,00	61,48
KHCD Abstand 1,3mm	63,05	54,91
KHCM Abstand 0,7mm	98,14	95,42
KHCM Abstand 0,9mm	97,49	94,23
KHCM Abstand 1,1mm	96,55	92,69
KHCM Abstand 1,3mm	95,18	90,64

Tabelle 6: Vergleich der Dehnungsübertragung von KHCD und KHCM bei Änderung des Abstandes der Schweißpunkte von der DMS-Mitte

Bei gleicher Abstandsänderung verändert sich die durchschnittliche Dehnungsübertragung beim KHCM nur um ca. 5% von 95,42% auf 90,64%. Beim KHCD sind es jedoch ca. 17%. Außerdem geht beim KHCD die durchschnittlich Dehnungsübertragung sogar bis auf 54,91% zurück. Diese hohe Ungenauigkeit stellt für die Anwendung des DMS in der Praxis ein erhebliches Problem dar, da diese Ungenauigkeit nicht bekannt ist.

4.2.3 Anzahl der Schweißpunkte in Messrichtung

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Anzahl der Schweißpunkte in der Schweißpunktreihe, wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, rechnerisch untersucht.

Hierfür werden je DMS-Typ 3 verschiedene Abstände geprüft. Je nach Abstand der Schweißpunkte und Länge des DMS ergibt sich die Anzahl der Schweißpunkte. Bild 24 zeigt Skizzen der verwendeten Parameter. Es wurde wieder die Referenzschweißpunktreihe aus Abschnitt 4.2.2 verwendet. Diese hat einen Abstand von 1,1 mm zur DMS-Mitte. Bei dieser Versuchsreihe bleibt dieser Abstand konstant und es wird der Abstand zwischen den Schweißpunkten verändert. Dafür sind 1,0 mm, 1,5 mm sowie 2,0 mm als realistische und beispielhafte Abstände herausgesucht worden. Damit ergeben sich für die einzelnen Modelle je nach DMS-Typ unterschiedliche Anzahlen der modellierten Schweißpunkte.

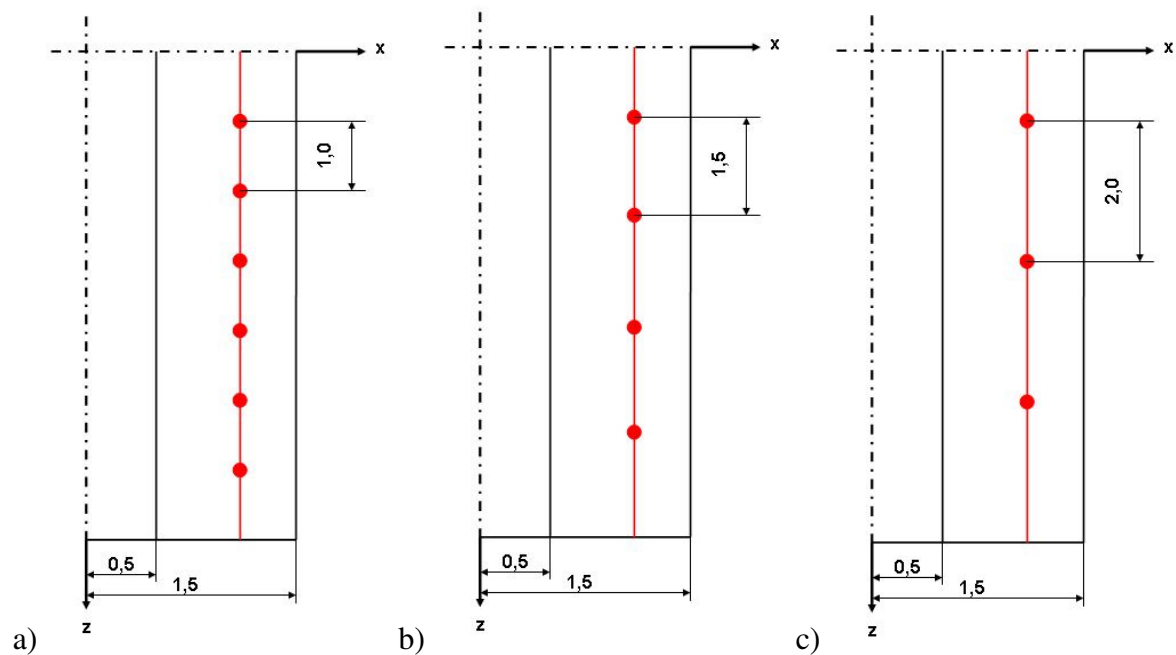


Bild 24: Abstand der Schweißpunkte in der Schweißpunktreihe: a) 1,0 mm b) 1,5 mm c) 2,0mm

Abstand der Schweißpunkte zueinander [mm]	Anzahl der Schweißpunkte	
	KHCD	KHCM
1,0	5	10
1,5	4	7
2,0	3	5

Tabelle 7: Anzahl der modellierten Schweißpunkte beim Viertelmodell

Bei dieser Untersuchung wurden die Berechnungen wieder nach dem Prinzip aus Abschnitt 4.2.2 graphisch ausgewertet. Das heißt es wird wieder die Dehnungsübertragung über dem Längenverhältnis zur DMS-Gesamtlänge abgetragen. Die rot durchgezogenen Linien sind wieder die Referenzvarianten und entsprechen den Kurven aus vorangegangenem Abschnitt. Sowohl beim KHCD in Bild 25 als auch beim KHCM in Bild 26 wird deutlich, dass mit zunehmendem Abstand der Schweißpunkte die Dehnungsempfindlichkeit merklich nachlässt. Beim Blick auf beide Diagramme stellt sich wieder die größere Dehnungsübertragung am KHCM heraus. Die Ursache ist die größere Längenabmessung für den Messdraht und DMS-Länge. In Tabelle 8 sind die dazu passenden Zahlenwerte angegeben.

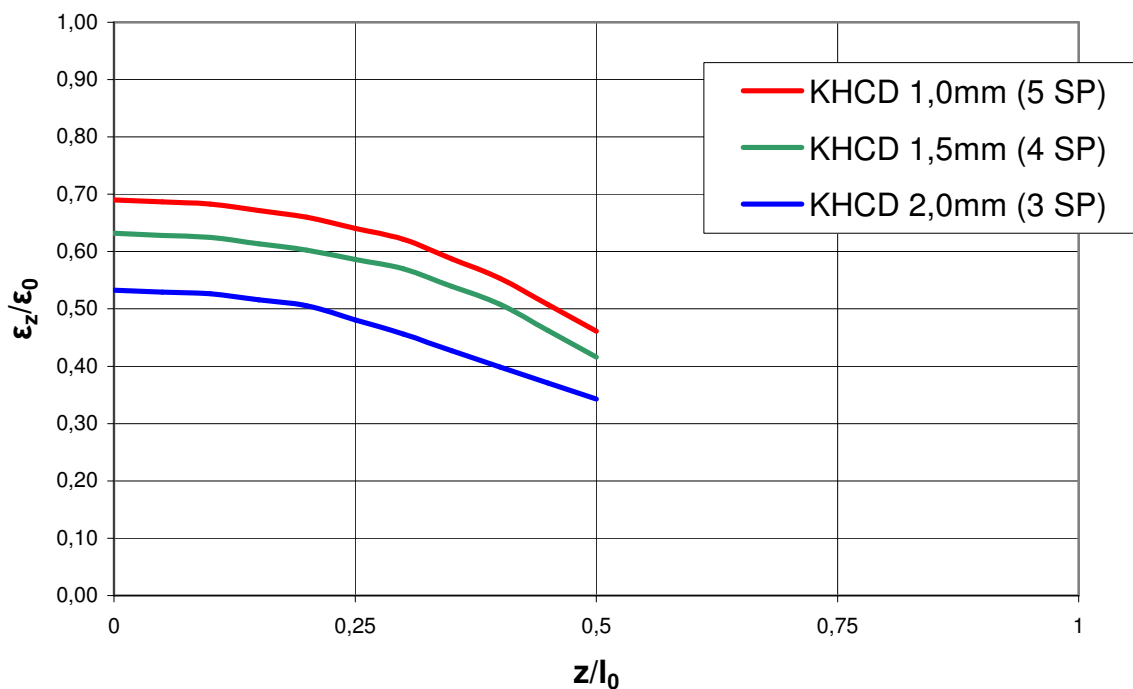


Bild 25: Diagramm KHCD - Abstand der Schweißpunkte in Messrichtung

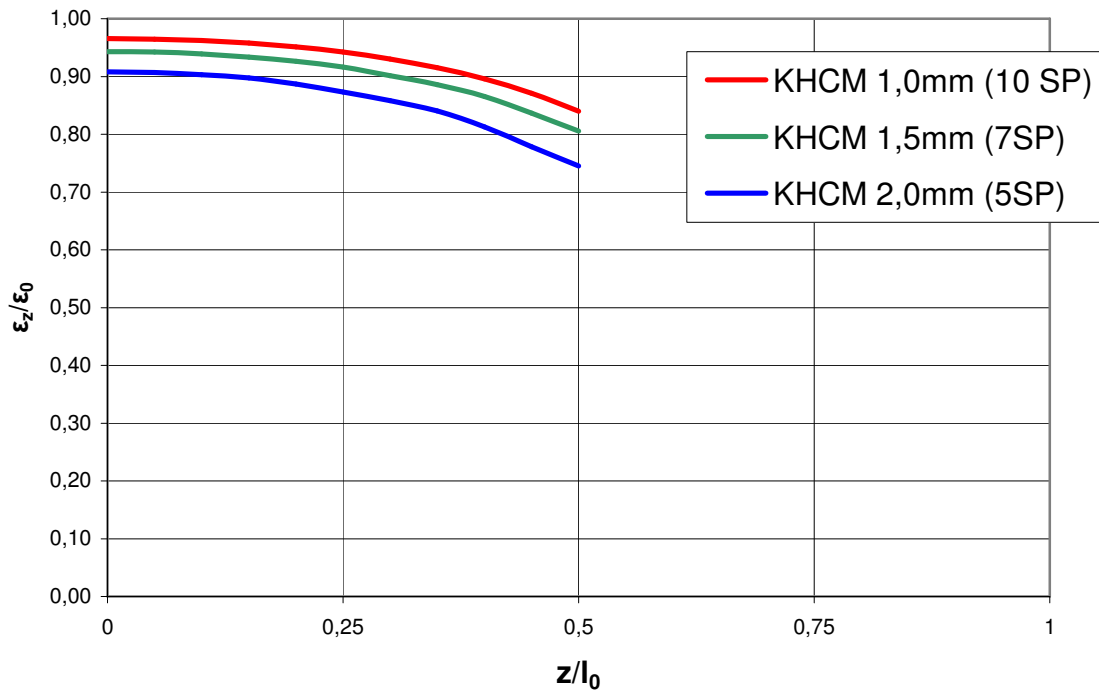


Bild 26: Diagramm KHCM - Abstand der Schweißpunkte in Messrichtung

Name des Modells	maximale Dehnungsübertragung ϵ_z/ϵ_0 in [%]	durchschnittliche Dehnungsübertragung in [%]
KHCD Δz 1,0mm	69,00	61,48
KHCD Δz 1,5mm	63,19	56,22
KHCD Δz 2,0mm	53,27	46,24
KHCM Δz 1,0mm	96,55	92,69
KHCM Δz 1,5mm	94,30	89,96
KHCM Δz 2,0mm	90,83	85,55

Tabelle 8: Vergleich der Dehnungsübertragung von KHCD und KHCM bei Änderung der Abstandes der Schweißpunkte zueinander

Anhand dieser Zahlenwerte wird noch einmal der Zusammenhang klar. Je größer der Abstand der Schweißpunkte zueinander ist, desto geringer ist die Dehnungsübertragung.

Der schlechteste Fall ist hier der KHCD mit einem Schweißpunktabstand von 2,0 mm und einer durchschnittlichen Dehnungsübertragung von ca. 46%.

4.2.4 Beliebige Anordnung der Schweißpunkte

Um eine weitestgehend beliebige Anordnung der Schweißpunkte modellieren zu können, muss eine andere Vernetzungsstrategie als wie bisher eingesetzt werden. Eine mögliche Strategie ist in Abschnitt 4.1.2 als „hard point - Variante“ beschrieben. Diese wird auch im Folgenden verwendet.

Am Beispiel des KHCD wird dies einmal demonstriert. Es wird eine beliebige Schweißpunktverteilung wie in Bild 27 vorgegeben. Die rot hervorgehobenen Dreiecke stellen die Verschiebungsrandbedingungen für die Schweißpunkte dar. Die Koordinaten der Schweißpunkte dazu sind in Tabelle 9 dargestellt. Die Auswahl der Lage erfolgte rein willkürlich.

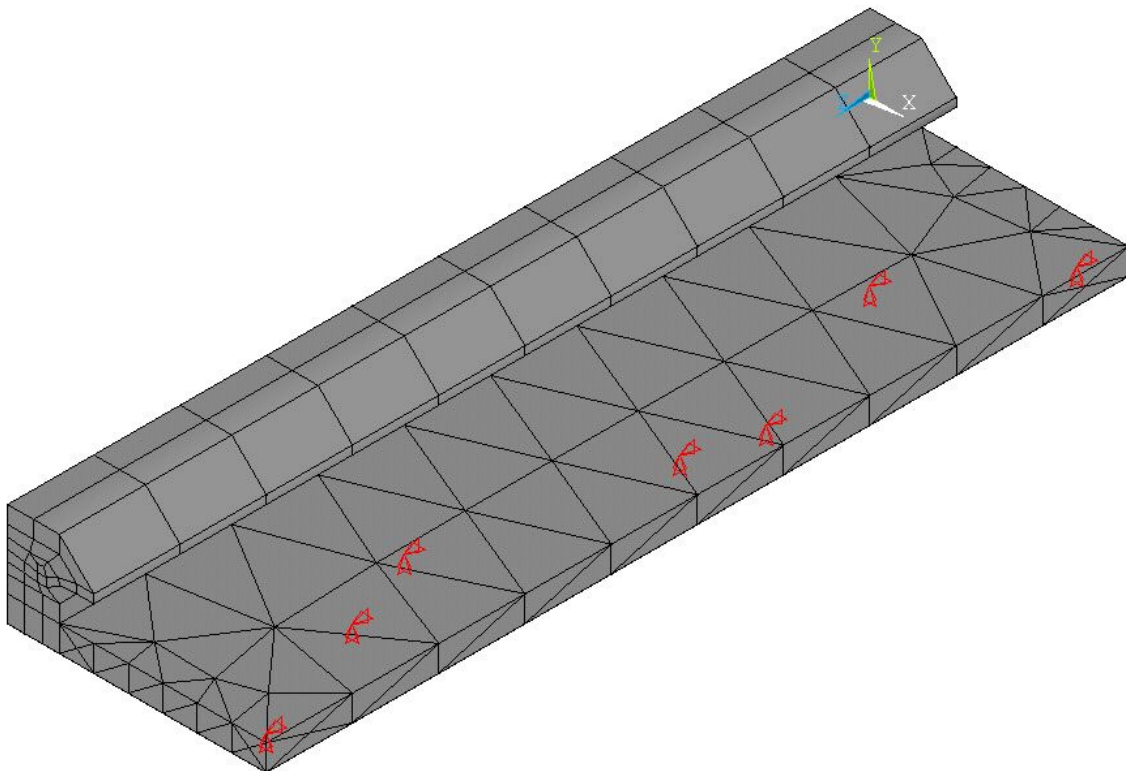


Bild 27: Beispiel: beliebige Schweißpunktverteilung am KHCD

Nr. des Schweißpunktes	x Koordinate	z Koordinate
1	1,3	0,1
2	0,8	0,8
3	1,2	1,8
4	1,1	2,2
5	0,8	3,5
6	1,0	4,0
7	1,3	4,8

Tabelle 9: Koordinaten der beliebig verteilten Schweißpunkte

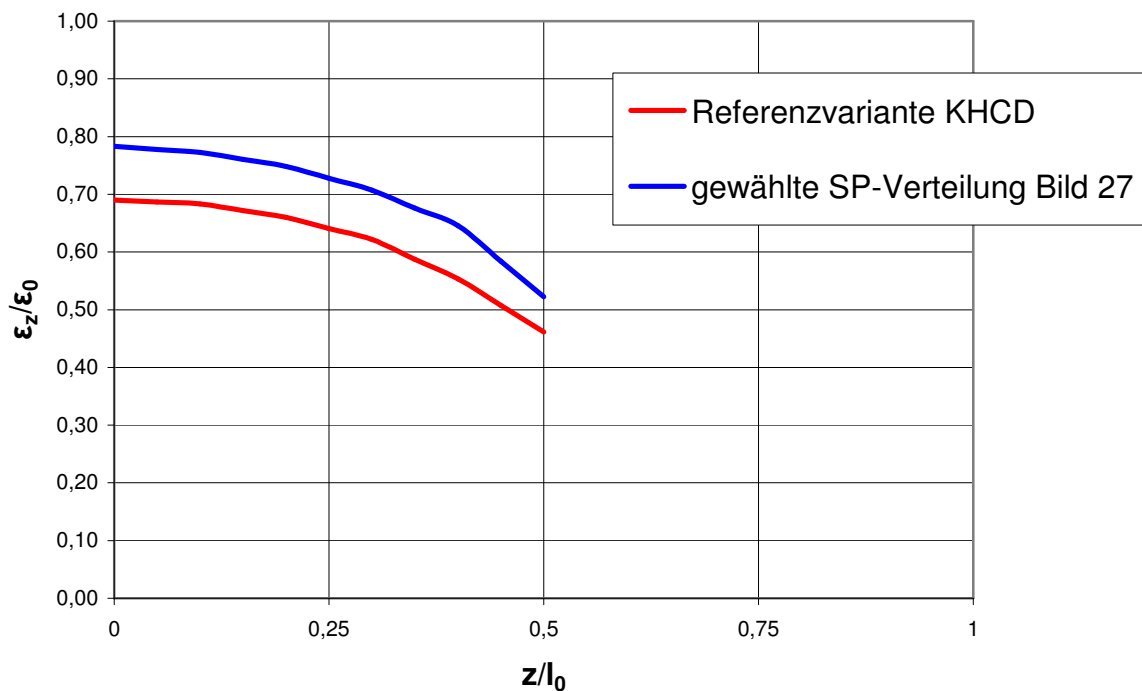


Bild 28: Diagramm KHCD - beliebige Schweißpunktverteilung

Mit dem Diagramm in Bild 28 soll deutlich gemacht werden, dass jede zufällige Schweißpunktverteilung eine andere Dehnungsübertragung ϵ_z/ϵ_0 besitzt. Hier in diesem Fall beim KHCD ist dieser Unterschied sehr deutlich.

4.3 Ausblick

Für beliebige Schweißpunktverteilungen kann die Dehnungsübertragung mit Hilfe der FEM berechnet werden. Damit ist es prinzipiell möglich, nach der Erfassung der Lage der Schweißpunkte präparierter HT-Röhrchen-DMS, die reale Dehnungsübertragung zu berechnen und bei der Auswertung der Dehnung aus der gemessenen Widerstandsänderung zu berücksichtigen.

Bei einer solchen Berechnung ist dann ein Viertelmodell nicht mehr sinnvoll. An dieser Stelle sollte jedoch nur die Machbarkeit gezeigt werden. Es könnte, nach der hier verwendeten Strategie, auch ein kompletter DMS modelliert und berechnet werden.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: SchweißEinstellungen der angefertigten Proben	9
Tabelle 2: Auswertung der metallographischen Schliffe	11
Tabelle 3: Vergleich regelmäßige und freie Vernetzung	18
Tabelle 4: Abmessungen der beiden DMS-Typen	22
Tabelle 5: Abstand von DMS-Mitte.....	23
Tabelle 6: Vergleich der Dehnungsübertragung von KHCD und KHCM bei Änderung des Abstandes der Schweißpunkte von der DMS-Mitte.....	25
Tabelle 7: Anzahl der modellierten Schweißpunkte beim Viertelmodell	27
Tabelle 8: Vergleich der Dehnungsübertragung von KHCD und KHCM bei Änderung der Abstandes der Schweißpunkte zueinander	28
Tabelle 9: Koordinaten der beliebig verteilten Schweißpunkte	30

Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Gekapselter Hochtemperatur-Röhrchen-DMS	2
Bild 2: Vorgehensweise, die bei der Befestigung eines Röhrchen-DMS empfohlen wird:	3
Bild 3: Temperaturgang eines Viertelbrücken-DMS	4
Bild 4: Nullpunktdrift eines freien Konstantandrahtes in Luft und Argon nach [3; S.513].....	5
Bild 5: Temperaturabhängigkeit des k-Faktors des Halbbrücken-HT-DMS KHCM von KYOWA [4]	6
Bild 6: Abstand der Schweißpunkte [5; S.2].....	7
Bild 7: Abstand der Schweißpunkte vom DMS-Röhrchen [5; S.2]	8
Bild 8: Handpunktschweißgerät [6; S.58]	9
Bild 9: Anschliff eines Mikroschweißpunktes	10
Bild 10: Abreißprobe F10P1B.....	14
Bild 11: Abreißprobe F10P2B.....	14
Bild 12: Abreißprobe F20P1B.....	15
Bild 13: Abreißprobe F50P1B.....	15
Bild 14: Doppelsymmetrie des Modells (Skizze)	16
Bild 15: Viertelmodell des HT-DMS	17
Bild 16: Verformung des DMS ohne Kontaktelemente	19
Bild 17: Verformung des DMS mit Kontaktelementen	20
Bild 18: Vergleich der Dehnungsübertragung mit und ohne Kontakt	20
Bild 19: Abmessung des KHCD-5-200-G11 C2M [2].....	21
Bild 20: Abmessung des KHCM-10-120-G15-11 C2M [2].....	22
Bild 21: Abstand des SP vom DMS-Röhrchen	23
Bild 22: Diagramm KHCD - Abstand des Schweißpunktes vom DMS-Röhrchen.....	24
Bild 23: Diagramm KHCM - Abstand des Schweißpunktes vom DMS-Röhrchen.....	24
Bild 24: Abstand der Schweißpunkte in der Schweißpunktreihe: a) 1,0 mm b) 1,5 mm c) 2,0mm.....	26
Bild 25: Diagramm KHCD - Abstand der Schweißpunkte in Messrichtung	27
Bild 26: Diagramm KHCM - Abstand der Schweißpunkte in Messrichtung	28
Bild 27: Beispiel: beliebige Schweißpunktverteilung am KHCD.....	29
Bild 28: Diagramm KHCD - beliebige Schweißpunktverteilung	30

Literaturverzeichnis

- [1] VDI/VDE-Richtlinie 2635, Blatt 2 Entwurf: *Experimentelle Strukturanalyse* März 2001.
- [2] Naumann, Jochen: *Experimentelle Mechanik* Chemnitz, Technische Universität Chemnitz, Institut für Mechanik, Vorlesung 2003.
- [3] Rohrbach, Christof: *Handbuch für experimentelle Spannungsanalyse* Düsseldorf: VDI-Verlag, 1989 ISBN 3-18-400347-7.
- [4] Stockmann, M.; Naumann, J.; Cermáková, I.: *Untersuchung zur Messung mit DMS bei hohen Temperaturen* Chemnitz, GESA-Symposium, 12.-13.06.2003 Braunschweig, VDI Berichte Nr. 1757, S.99-108.
- [5] Preusser-Messtechnik: *TML-Informationen Juni 2001* <http://www.preusser-messtechnik.de>.
- [6] ZSE Electronic GmbH: *ZSE DMS-Katalog 03.01.01* Bietigheim-Bissingen: ZSE Electronic GmbH <http://www.zse.de>