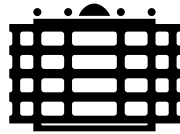


Experimentelle und numerische Untersuchungen an Dehnungsmessstreifen (DMS) mit übereinanderliegenden Messgittern

Studienarbeit



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik
Institut für Mechanik
Professur Experimentelle Mechanik

eingereicht von: cand.-ing. Martin Kreschel

betreuender Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. habil. Jochen Naumann
Fachbetreuer: Dr.-Ing. habil. Martin Stockmann

eingereicht am: 01. November 2002

Kreschel, Martin

Experimentelle und numerische Untersuchungen an Dehnungsmessstreifen (DMS) mit übereinanderliegenden Messgittern

Studienarbeit an der Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Technischen Universität Chemnitz, Institut für Mechanik, 2002

45 Seiten
7 Literaturzitate
9 Tabellen
39 Abbildungen

In der experimentellen Beanspruchungsanalyse ist der Einsatz von Dehnungsmessstreifen alltäglich. Besonders DMS-Rosetten mit übereinanderliegenden Messgittern bieten eine "punktgenaue" Auswertung des Dehnungszustandes an der Oberfläche eines Bauteiles. In numerischen und experimentellen Analysen wurde die Dehnungsübertragung in die übereinanderliegenden Messgitterschichten untersucht. Desweiteren wurde die Wärmeentwicklung der DMS-Rosetten auf verschiedenen Bauteilen untersucht.

Schlagworte:

Dehnungsmessstreifen, Rosette, FEM, Orthotropie, Laminattheorie, Mischungsregel, Zugversuch, Thermographie

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Aufgabenstellung	1
1.3	Vorgehensweise	1
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Aufbau eines Folien-DMS	3
2.2	Wirkungsmechanismus	4
2.3	Mechanische Grundlagen	4
2.4	WHEATSTONEsche Brückenschaltung	5
2.5	Bauweisen von Rosetten-DMS	7
3	Numerische Simulation	9
3.1	Die Methode der finiten Elemente	9
3.1.1	Elementtypen und Vernetzung	10
3.1.2	Solvertypen	10
3.2	Modellierung	11
3.2.1	3D-Komplettmodellierung	11
3.2.2	3D-Modellierung ohne Umlenkstellen	12
3.2.3	3D-Modellierung mit orthotropen Mischschichten	15
3.3	Auswertung der Simulationen	20
4	Experimentelle Untersuchungen	27
4.1	Dehnungsübertragung in einer DMS-Rosette	27
4.1.1	Experimenteller Aufbau	27
4.1.2	Durchführung	28
4.1.3	Ergebnisse	28
4.2	Untersuchung der Wärmeausbreitung mittels Thermographie	31
4.2.1	Das Verfahren der Thermographie	31
4.2.2	Experimenteller Aufbau	31
4.2.3	Ergebnisse	32
5	Schlussbemerkungen	39

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Die Verwendung von Dehnungsmessstreifen (DMS) zur experimentellen Analyse des Spannungszustandes von Bauteilen ist heutzutage weit verbreitet. Bei unbekanntem Hauptspannungsrichtungen ist es notwendig, Dehnungsmessungen in 3 verschiedenen Richtungen durchzuführen. Um diese möglichst an dem zu untersuchenden Punkt des Bauteils durchzuführen, kommen in der Praxis DMS-Rosetten zum Einsatz. Diese bestehen aus mehreren übereinanderliegenden Messgittern, welche fest miteinander verbunden sind. Aufgrund des schichtweisen Aufbaus der DMS-Rosetten kommt es in den oberen Schichten zu einem Abfall der Empfindlichkeit der Messgitter. Dieser Empfindlichkeitsabfall ist in der Praxis unerwünscht, da er die entstehenden Messergebnisse verfälscht.

1.2 Aufgabenstellung

Die Aufgabe dieser Studienarbeit besteht darin, ein parametrisches FE-Modell eines DMS mit übereinanderliegenden Messgittern zu erstellen. An diesem soll eine zielorientierte numerische Simulation des mechanischen Verhaltens durchgeführt und die Gültigkeit der gewonnenen Ergebnisse experimentell verifiziert werden.

Desweiteren soll die Erwärmung des DMS auf unterschiedlichen Werkstoffen mittels einer Infrarot-Thermokamera untersucht werden.

1.3 Vorgehensweise

Zuerst werden die theoretischen Grundlagen der Dehnungsmessstreifen und der elektrischen Dehnungsmessung erläutert. Dazu gehören der Aufbau und die Wirkungsweise der DMS, die mechanischen Grundlagen und die elektrische Verschaltung der DMS.

Anschließend werden die theoretischen Grundlagen der numerischen Simulationen erläutert. Es folgen Überlegungen und Vorgehensweise bei der schrittweisen Erarbeitung eines FE-Modelles, die Erstellung des Modelles und die Beschreibung der an diesem Modell durchgeführten Simulationen. Die Auswertung und Darstellung der numerischen Simulationsergebnisse erfolgt danach.

Es folgen Darstellungen zur Durchführung der durchgeführten experimentellen Untersuchungen. Zuerst werden die zur Absicherung der numerischen Simulationen durchgeführten Untersuchungen zur Dehnungsübertragung beschrieben. Es folgen theoretische Grundlagen zur Thermographie und die Darstellung der thermographischen Untersuchungen zur Wärmeausbreitung in DMS-Rosetten.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

In der Praxis kommen die im folgenden aufgelisteten Bauformen von Dehnungsmessstreifen zum Einsatz:

- Folien-DMS: bestehen aus einem Trägermaterial (z.B. Polyimid) und den eigentlichen Messstreifen (z.B. Konstantanfolie),
- Draht-DMS: auf einem Papierträger ist ein Konstandraht aufgebracht,
- Halbleiter-DMS: zeichnen sich durch ihre hohe Empfindlichkeit aus,
- DMS mit freigespannten Drähten: für Messungen bei hohen Temperaturen; werden auch als Röhren-DMS bezeichnet.

Für die in dieser Arbeit durchgeführten numerischen und experimentellen Untersuchungen wurden Folien-DMS unterschiedlicher Größen und Hersteller herangezogen.

2.1 Aufbau eines Folien-DMS

Der Aufbau eines Folien-DMS ist in Abb. 2.1 zu sehen. Bei der Präparation einer Messstelle wird dieser flächig mit Klebstoff auf der Oberfläche des Bauteils befestigt. Die Eigenschaften

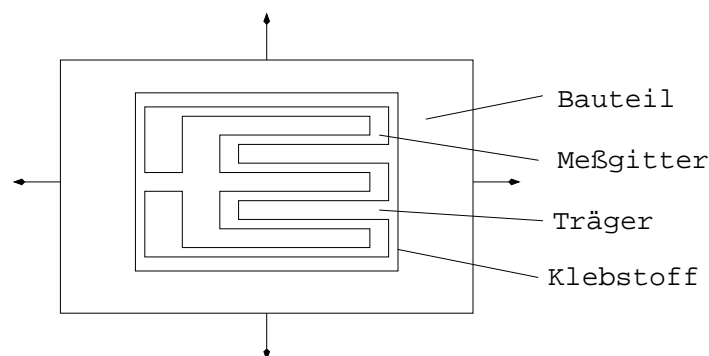


Abb. 2.1: Aufbau eines Folien-DMS

des Gesamtsystem aus Bauteil und DMS werden sowohl durch die Eigenschaften des DMS als

auch durch die durch den Präparator durchgeführte Präparation bestimmt.

Hervorzuheben sind die besonderen geometrischen Verhältnisse an der Präparationsstelle. Während die Abmessungen an der Bauteiloberfläche z.B. 5 x 10 mm betragen, sind die Schichtdicken um Größenordnungen kleiner. So beträgt die Dicke der Messgitterfolie etwa 3-5 μm , die des Trägers etwa 30-50 μm und die der Klebstoffschicht je nach Ausführung etwa 5-20 μm . Diese geometrischen Besonderheiten mussten bei der später beschriebene Modellierung per Finite Elemente Methode besondere Beachtung finden.

Alle in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen beziehen sich auf die in der Praxis häufig verwendete Materialkombination Konstantangitter – Polyimidträger – Epoxidharzklebstoff. Die entsprechenden Materialkennwerte wurden ermittelt und fanden in den Berechnungen Verwendung.

2.2 Wirkungsmechanismus

Die Messung mit elektrischen Dehnungsmessstreifen beruht auf einem komplexen Wirkungsmechanismus, der vom einem an der Bauteiloberfläche liegenden Deformationstensor bis zu einer messbaren Widerstandsänderung im metallischen Teil des DMS reicht.

Wichtige Bestandteile der Übertragungskette sind zum einen die Dehnungsübertragung vom Bauteil in die Trägerfolie des DMS und zum anderen die besonders bei Rosetten mit übereinanderliegenden Messgitterschichten interessierende Übertragung in die oberen Schichten des DMS.

2.3 Mechanische Grundlagen

Der Widerstand eines metallischen Leiters ist durch 3 voneinander unabhängige Größen (Abb. 2.2) bestimmbar. Dabei ist er direkt proportional zum spezifischen elektrischen Widerstand ρ des

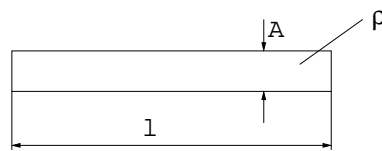


Abb. 2.2: Widerstandsparameter eines metallischen Leiters

Leiters und der Leiterlänge l . Indirekt proportional ist er zum Leiterquerschnitt A . Damit entsteht folgender Zusammenhang:

$$R(l, A, \rho) = \rho \frac{l}{A} \quad (2.1)$$

Die Änderung von R bei Änderung der 3 Größen kann durch das totale Differential dR beschrieben werden:

$$dR = \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial A} dA + \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho \quad (2.2)$$

Setzt man kleine Änderungen der differentiellen Größen voraus ($d \Rightarrow \Delta$) und dividiert durch R , so erhält man die relative Widerstandsänderung in folgender Form:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (2.3)$$

Mit den Vereinfachungen

$$\frac{\Delta l}{l} = \varepsilon \quad \frac{\Delta A}{A} = -2\nu \cdot \varepsilon,$$

dem Ansatz

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \beta_\rho \cdot \varepsilon$$

und dem Ausklammern der Dehnung ε ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\frac{\Delta R}{R} = \underbrace{(1 + 2\nu + \beta_\rho)}_{k \dots k\text{-Faktor}} \cdot \varepsilon. \quad (2.4)$$

Dabei wird β_ρ als Konstante für die Änderung des spezifischen elektrischen Widerstands eingeführt. Somit entsteht die Grundgleichung bei der Messung mit Dehnungsmessstreifen:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon. \quad (2.5)$$

Für die häufig verwendete Leiterlegierung Konstantan (CuNi44) beträgt der k-Faktor etwa 2.0 – 2.1. Diese setzen sich aus dem Anteil der Längsdehnung ($= 1$), dem Anteil der Querdehnung ($= 2\nu \approx 0,6$) und dem Anteil aus β_ρ zusammen. Somit liegt der Anteil der Widerstandsänderung bei etwa 0,4 – 0,5.

2.4 WHEATSTONEsche Brückenschaltung

Die zu erwartenden relativen Widerstandsänderungen im elastischen Dehnungsbereich liegen bei etwa $2 - 4 \cdot 10^{-3}$, so daß eine Auflösung und Messgenauigkeit in einer Größenordnung von $10^{-5} \dots 10^{-6}$ vonnöten ist, um eine reproduzierbare Messung durchzuführen.

Das DMS-Ausgangssignal - eine Widerstandsänderung - wird mit Hilfe der Wheatstoneschen Brückenschaltung indirekt in eine Spannungsänderung überführt und einem geeigneten Messverstärker zugeführt. Dieser übernimmt die Signalverstärkung der Messspannung an der DMS-Brückenschaltung.

Die in Abb. 2.3 dargestellte Brückenschaltung besteht aus 4 variablen Widerständen R_1 bis R_4 . Während zwischen den Punkten C und D die Speisespannung U_S angelegt wird, erfolgt der Abgriff der Messspannung zwischen den Punkten A und B.

Die Änderung der Widerstände wird dabei wie folgt eingeführt:

$$R_i = R + \Delta R_i = R \cdot \left(1 + \frac{\Delta R_i}{R}\right) = R \cdot (1 + r_i) \quad \text{mit } r_i = \frac{\Delta R_i}{R} \quad (2.6)$$

Somit ergeben sich für die Ströme in den beiden Strängen:

$$I_{1/2} = \frac{U_S}{R_1 + R_2} = \frac{U_{1/2}}{R_2} \Rightarrow \frac{U_{1/2}}{U_S} = \frac{1 + r_2}{2 + r_1 + r_2} \quad (2.7)$$

$$I_{3/4} = \frac{U_S}{R_3 + R_4} = \frac{U_{3/4}}{R_3} \Rightarrow \frac{U_{3/4}}{U_S} = \frac{1 + r_3}{2 + r_3 + r_4} \quad (2.8)$$

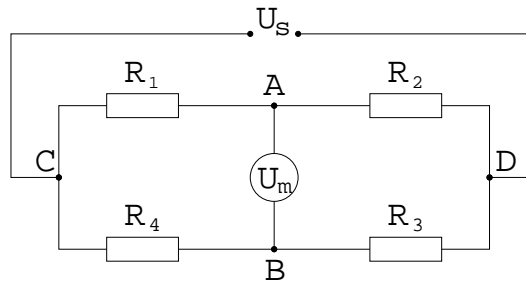


Abb. 2.3: Grundprinzip der WHEATSTONEschen Brückenschaltung

Mit der Einführung der Messspannung ($U_M = U_{3/4} - U_{1/2}$) ergibt sich die relative Spannungsänderung somit zu:

$$\frac{U_M}{U_S} = -\frac{1+r_2}{2+r_1+r_2} + \frac{1+r_3}{2+r_3+r_4} \quad (2.9)$$

Dies ist die nichtlineare Gleichung der Wheatstoneschen Brückenschaltung, die für beliebige Brückenverstellungen eingesetzt werden kann. Für kleine relative Widerstandsänderungen kann die Näherung

$$\frac{1}{1+x} \approx 1-x$$

eingeführt werden. Angewendet auf die Gleichung (2.9) entsteht die linearisierte Form der Gleichung der Wheatstoneschen Brücke zu

$$\frac{U_M}{U_S} = \frac{1}{4} \cdot (r_1 - r_2 + r_3 - r_4) \quad (2.10)$$

In der Praxis werden die in Tab. 2.1 aufgeführten Grundschaltungen von DMS in einer Wheatstoneschen Brücke angewendet:

Name	Gleichung	Anwendung
Viertelbrücke	$\frac{U_M}{U_S} = \frac{1}{4} \cdot r_1$	Zug-/Druckstab, Biegung
Halbbrücke	$\frac{U_M}{U_S} = \frac{1}{4} \cdot (r_1 - r_2)$	Biegebalken, Torsion
Vollbrücke	$\frac{U_M}{U_S} = \frac{1}{4} \cdot (r_1 - r_2 + r_3 - r_4)$	Biegung, Torsion

Tab. 2.1: Grundschaltungen von DMS

Die relativen Widerstandsänderungen können über die Grundgleichung der Messung mit DMS (2.5) durch die Dehnungen in folgender Form ersetzt werden: $r_i = k \cdot \varepsilon_i$.

Zum Ausgleichen von Nullpunktabweichungen und Empfindlichkeitsfehlern werden in der Praxis folgende Anschlusstechniken eingesetzt:

- **Zweileitertechnik:** 2 Zuleitungen zum DMS; wird in der Praxis nicht angewendet,
- **Dreileitertechnik:** Zusätzlicher 3. Leiter; der Nullpunktfehler wird ausgeglichen, der Empfindlichkeitsfehler wird geringer, aber nicht vermieden,

- **Vierleitertechnik:** 2 Speise- und 2 Messeleitungen zum DMS; die Wirkungsweise ist nur in Verbindung mit Verstärkertechnik erklärbar; der Nullpunkt- und der Empfindlichkeitsfehler werden kompensiert.

2.5 Bauweisen von Rosetten-DMS

Bei bekannter Hauptspannungsrichtung im Bauteil werden die Dehnungen ε_1 und ε_2 in den beiden senkrecht aufeinander stehenden Hauptspannungsrichtungen ermittelt. Aus diesen können dann mit den folgenden Formeln die Hauptspannungen berechnet werden:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_1 + \nu \cdot \varepsilon_2) \quad \sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_2 + \nu \cdot \varepsilon_1) \quad (2.11)$$

Bei unbekanntem Hauptspannungsrichtungen kommen DMS-Rosetten mit 3 Messgittern zum Einsatz. Diese Messgitter können sowohl nebeneinander als auch übereinander angeordnet sein. Vorteile der übereinanderliegenden Messgitter sind eine kompakte Bauweise des DMS und ein wirklich "punktgenaues" Ermitteln der Dehnungen. Desweiteren gibt es 2 typische Anordnungsformen von DMS-Rosetten: In Abb. 2.4 sind als Nr. 1 eine rechtwinklige Rosette und

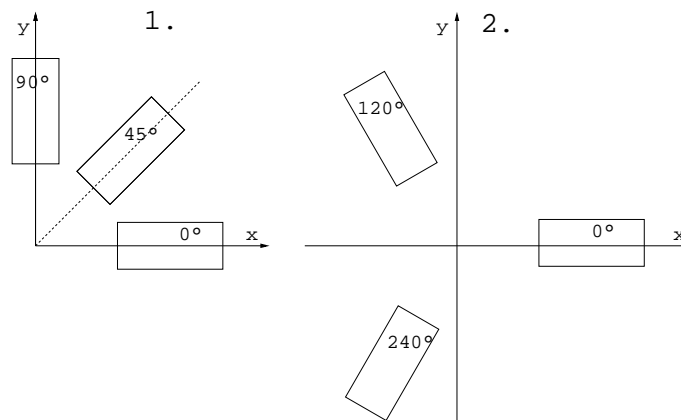


Abb. 2.4: Bauformen von DMS-Rosetten

als Nr. 2 eine Delta-Rosette dargestellt.

In der rechtwinkligen Rosette entsprechen $\varepsilon_x = \varepsilon_{0^\circ}$ und $\varepsilon_y = \varepsilon_{90^\circ}$. Aus diesen Dehnungen und ε_{45° lässt sich γ_{xy} zu

$$\gamma_{xy} = 2 \cdot \varepsilon_{45^\circ} - (\varepsilon_{0^\circ} + \varepsilon_{90^\circ}) \quad (2.12)$$

berechnen.

In der Delta-Rosette entspricht $\varepsilon_x = \varepsilon_{0^\circ}$. Die übrigen Dehnungen werden aus ε_{60° und ε_{120° berechnet:

$$\varepsilon_y = \frac{2}{3} \cdot (\varepsilon_{60^\circ} + \varepsilon_{120^\circ}) - \frac{1}{3} \cdot \varepsilon_{0^\circ} \quad (2.13)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2}{3} \sqrt{3} \cdot (\varepsilon_{60^\circ} - \varepsilon_{120^\circ}) \quad (2.14)$$

Aus diesen Dehnungen werden über das HOOKEsche Gesetz die Spannungen berechnet:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_x + \nu \cdot \varepsilon_y) \quad (2.15)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\varepsilon_y + \nu \cdot \varepsilon_x) \quad (2.16)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1-\nu)} \cdot \gamma_{xy} \quad (2.17)$$

In Abb. 2.5 sind weitere typische Anordnungsformen von DMS-Rosetten dargestellt. Die An-

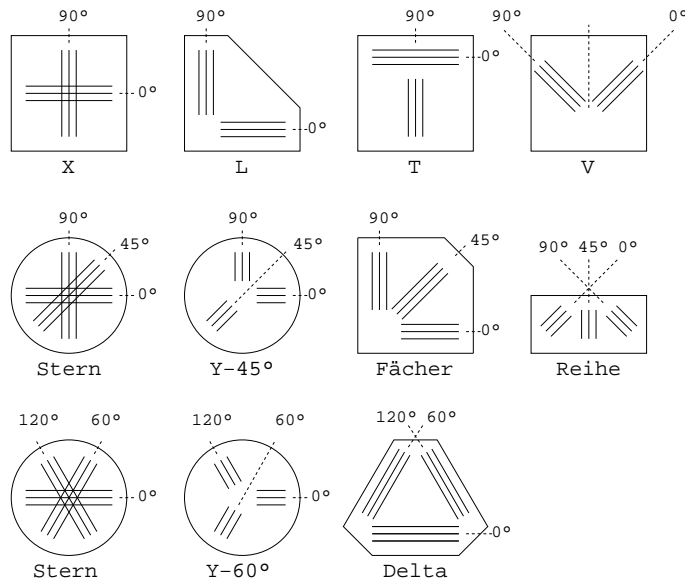


Abb. 2.5: weitere Bauformen von DMS-Rosetten

ordnungsmöglichkeiten und Messlängen der Messgitter sind dabei von Hersteller zu Hersteller unterschiedlich und werden verschieden kombiniert.

Kapitel 3

Numerische Simulation

Die numerischen Analysen wurden mit dem kommerziellen FEM-Programmpaket ANSYS in der Release 5.7.1 durchgeführt. Es wird von SAS, Inc. Corporate aus Canonsburg/Pennsylvania (USA) hergestellt. In Deutschland wird es von der CAD-FEM GmbH aus Gräfing bei München vertrieben.

ANSYS erlaubt Entwicklungsingenieuren Computermodelle von komplexen Strukturen, wie Einzelteilen oder Baugruppen, zu erstellen und zu berechnen. In ANSYS sind eine Vielzahl von Analysemöglichkeiten integriert, die es für folgende Hauptanwendungen einsatzfähig machen:

- Statische Spannungs- und Verformungsanalysen
- Eigenfrequenz- und Frequenzganganalysen
- Dynamische Analysen
- Wärmeübertragungs- und Temperaturfeldberechnungen
- Magnetfeldberechnungen
- Berechnung elektrischer Felder

Angeboten wird ANSYS für verschiedenste Hardware-Plattformen, u.a. für HP-UX, AIX, IRIX, Solaris, Alpha, Linux-x86 und Windows NT.

3.1 Die Methode der finiten Elemente

Die Methode der finiten Elemente ist ein bereichsweises Näherungsverfahren zur rechnerischen Simulation von physikalisch-technischen Problemen. Dabei werden für endlich große Bereiche (finite Elemente) Ansatzfunktionen mit Freiwerten und Randbedingungen aufgestellt, die aufgrund ihrer finiten Eigenschaft niedriger Ordnung sind. Für Festigkeitsberechnungen verwendet man lineare oder quadratische Ansatzfunktionen. Die so eingeführten Elemente sind durch Knoten kontinuierlich mit ihren Nachbarelementen verbunden. Für das komplizierte Verhalten des Gesamtsystems werden innerhalb der Elemente vereinfachte Annahmen getroffen, die auf ein lineares Gleichungssystem für die Freiwerte an den Knoten führen. Durch Lösen des Gleichungssystems erhält man Näherungslösungen für das Gesamtsystem.

Für konkrete technische Aufgaben werden anstelle der frei wählbaren Koeffizienten der Ansatzfunktionen physikalisch deutbare Größen gesetzt. So verwendet der in der oben erwähnten Festigkeitsberechnung verwendete Ansatz 3 Verschiebungs- und 3 Rotationsfreiheitsgrade pro Knoten. Für andere technische Probleme sind dies u.a. Temperaturen oder magnetische Potentiale.

Der verwendete Verschiebungsansatz approximiert in der Regel nur das wahre Verschiebungsfeld. Somit weicht jede FEM-Lösung von der unbekannt wirklichen Lösung ab. Die Güte dieser FEM-Näherungslösung kann dabei beliebig genau durch folgende Methoden verbessert werden:

- **p-Konvergenz:** Die Polynomordnung der Ansatzfunktion wird erhöht, was zu einer größeren Anzahl an Anstzfreiwerten führt,
- **h-Konvergenz:** Die Größe der Elemente wird verkleinert, was zu einer Erhöhung der Elementanzahl führt,
- **h,p-Konvergenz:** Die Polynomordnung der Ansatzfunktion wird erhöht und gleichzeitig die Größe der Elemente verkleinert,
- **r-Konvergenz:** Die Knoten werden in der Form verschoben, dass ungünstige Elementformen beseitigt werden. Dabei bleibt die Anzahl der Freiheitsgrade erhalten.

3.1.1 Elementtypen und Vernetzung

Für eine durchzuführende FEM-Berechnung ist ein geeignetes geometrisches Modell des zu untersuchenden Bauteils notwendig. Dies kann im FEM-Programm selbst oder über geeignete Schnittstellen aus CAD-Programmen importiert werden.

Shell-Elemente: Shell-Elemente sind zweidimensionale Schalen-Elemente mit 6 Knotenfreiheitsgraden (3 translative und 3 rotative Freiheitsgrade). Sie bestehen in der Regel aus 3, 4, 6 oder 8 Knoten, aus denen sich 3- oder 4-kantige Elemente erstellen lassen. Anwendungen für diese Elementtypen bestehen in Bauteilen, bei denen die Dicke gegenüber den übrigen Abmessungen gering ist und sowohl Normal- als auch Biegespannungen auftreten. Sie können sowohl Kräfte parallel zur Mittelfläche als auch Kraftkomponenten senkrecht zu dieser Fläche. Eingeschränkt sind Shell-Elemente durch ihr Radius-Dicken-Verhältnis, d.h. es können nicht beliebig stark gekrümmte Modelle mit ihnen vernetzt werden.

Solid-Elemente: Solid-Elemente sind dreidimensionale Volumen-Elemente mit 3 translatorischen Knotenfreiheitsgraden. Sie bestehen aus 4 bis 27 Knoten, aus denen sich prismatische, kubische und tetraederartige Elemente erstellen lassen. Anwendungen für diese Elementtypen sind Bauteile in allen 3 Koordinatenrichtungen.

3.1.2 Solvertypen

Für die Lösung des entstehenden linearen Gleichungssystems gibt es unterschiedliche mathematische Wege. Entscheidend sind die Anzahl der Freiheitsgrade des Modells, der mechanische Anwendungsfall und der hauptsächlich verwendete Elementtyp im Modell.

Zur Lösung von Gleichungssystemen kommen 2 Gruppen von Verfahren zur Anwendung:

- Direkte Verfahren, bei denen die exakte Lösung innerhalb der Rundungsgenauigkeit gefunden werden kann, und
- iterative Verfahren, bei denen die exakte Lösung durch sukzessive Approximation angenähert wird.

Zu den direkten Lösungsverfahren zählen das Gaußsche Verfahren, das Frontlösungsverfahren und das Sparse-Matrix-Verfahren. Sie beruhen auf der Elimination von Gleichungen. Diese Verfahren eignen sich für kleinere Modelle bis zu einem Freiheitsgrad von 500.000 und beanspruchen für die Lösung viel Festplattenspeicher, jedoch nur wenig Arbeitsspeicher.

Im Gegensatz dazu benötigen die iterativen Lösungsverfahren wenig Festplattenspeicher und viel Arbeitsspeicher des Systems. Zu ihnen das Gauß-Seidel-Verfahren und die Methode der konjugierten Gradienten. Sie erfordern im allgemeinen sehr viel weniger Rechenzeit als direkte Verfahren und können Systeme mit mehr als 1 Million Freiheitsgraden lösen.

3.2 Modellierung

Die zu erstellenden FE-Modelle sollen Dehnungsmessstreifen mit übereinanderliegenden Messgittern geeignet abbilden. Um die Berechnungen für verschiedene Ausführungen von DMS-Rosetten durchführen zu können, sollen für folgende charakteristische Größen Parameter eingeführt werden:

- die Dicken der einzelnen Schichten,
- die Abmessungen des DMS in der Bauteilebene, und
- die Richtungen der übereinanderliegenden Messgitter.

Bei der Wahl des zu verwendenden Elementtyps stehen 3D-Solid- und 2D-Shell-Elemente zur Wahl. Die bereits in Kapitel 2.1 erwähnten besonderen geometrischen Abmessungen des DMS mit einem Höhen-Längenverhältnis von 1:500 sprechen hierbei für die Verwendung von 2D-Shell-Elementen. Allerdings bieten die in ANSYS implementierten Shell-Elemente nicht die Möglichkeit, eine schichtweise Auswertung der Dehnungen vorzunehmen. Dies ist allerdings für die Simulation der Dehnungsübertragung in die Schichten des DMS notwendig. Deshalb wird bei der Modellierung auf 3D-Solid-Elemente zurückgegriffen.

Der generelle Aufbau eines Dehnungsmessstreifens mit übereinanderliegenden Schichten besteht schematisch aus 7 Schichten, wobei in Abb. 3.1 nur der Bereich der direkt übereinanderliegenden Schichten dargestellt ist. Eine nähere Beschreibung der Schichten erfolgt im nachfolgenden Teil der Modellierungsbeschreibung.

3.2.1 3D-Komplettmodellierung

Eine reale Abbildung der Komplettgeometrie des DMS umfasst die exakte Modellierung der Leiterbahnen, der die Leiterbahnen verbindenden Umlenkstellen, des Trägermaterials und der Kleberschicht zwischen DMS und Bauteil.

Für die Modellierung bietet sich ein parametrisches CAD-System an. Nachteilig hierbei sind die zu verwendenden Import- und Export-Schnittstellen der CAD- und FE-Programme.

Ein weiterer Abstraktionsgrad ist eine Beschränkung des Modells auf einen Ausschnitt des Bauteils. Bei einer Einschränkung auf den Bereich der Messgitter wird der Einfluß des umliegenden Polyimid-Trägers nicht berücksichtigt. Dieser wirkt aufgrund seines geringen E-Moduls nicht versteifend. Somit werden auch die Anschlußleitungen und Umlenkstellen der Messgitterschichten nicht mit berücksichtigt. Dies bewirkt eine geringe Reduktion der Querempfindlichkeit des DMS aufgrund des Wegfalls der Querverbindungen zwischen den Leiterbahnen. Da die Umlenkstellen beim realen DMS stets einen größeren Querschnitt als die Leiterbahnen besitzen, sind die Verbindungen zwischen den Leiterbahnen sehr steif. Somit kann von einer stabilen Lage der Leiterbahnen zueinander ausgegangen werden.

Auf der Grundlage dieser Abstraktionen soll nun die Modellierung des DMS vorgenommen werden. Ein sinnvoller Ablaufplan zur Modellierung der Leiterbahnen besteht dabei aus den folgenden logischen Schritten:

1. Aufbau eines mehrschichtigen rechteckigen Volumenmodells, wobei jede Schicht die gesamte Geometrie der abzubildenden Leiterbahnen enthalten muss. Somit konnte eine Schicht erstellt und dann vervielfältigt werden, und
2. Zuweisen der Materialeigenschaften zu den betreffenden Elementen.

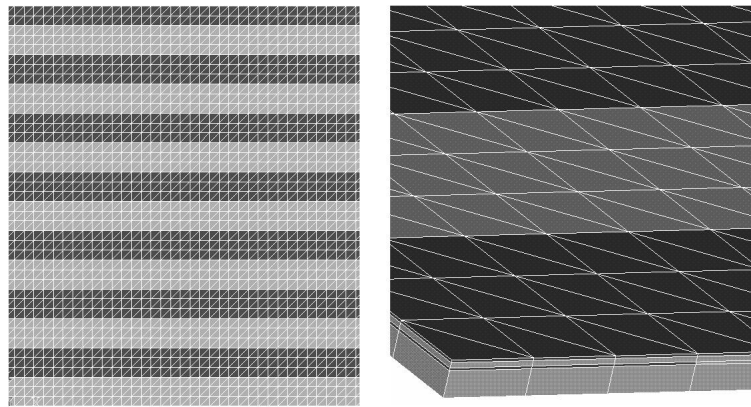


Abb. 3.2: Messgitterschicht x-Richtung (li) und Zusammenbau (re)

Durch die Auswahl von Elementen und Zuweisen von Materialeigenschaften kann die Struktur des Messgitters nachgebildet werden. Dabei wird den betreffenden Elementen isotropes und lineares Materialverhalten zugewiesen.

Bei der Selektion von Elementen zur anschließenden Zuweisung des Materialmodells gestaltet es sich einfacher, zuerst allen Elementen als Material Polyimid zuzuweisen. Anschließend lassen sich die Elemente für die Konstantandrähte auswählen.

Die Breite der Stege wird durch das Aneinandersetzen mehrerer Elemente bestimmt. Ebenso lassen sich durch das Auswählen der Materialien die Volumenanteile von Konstantan und Polyimid bestimmen. Hier bestehen Beschränkungen hinsichtlich der Verteilung der Volumenanteile. So lassen sich nur ganzzahlige Verhältnisse der beiden Bestandteile realisieren. Die Bandbreite der Volumen-Verhältnisse kann durch eine ganzzahlige Unterteilung der Elemente erweitert werden. Das zieht jedoch eine quadratische Vervielfachung der Elementanzahl nach sich.

Grundsätzliche Einschränkungen bestehen bei der Richtungswahl der einzelnen Messgitterschichten. Schichten in 0° - und 90° -Richtungen lassen sich sehr einfach erstellen, da bei diesen Richtungen jeweils nur aufeinanderfolgende Elemente selektiert werden müssen. Für die 45° -Richtung wird die parametrische Auswahl der Elemente schon wesentlich schwieriger. Man kann deren Richtung nur durch die Form der zu erstellenden Elemente bestimmen. Dies ist bei rechtwinklig zueinanderstehenden Leitern noch einfach durch Rechteckelemente möglich, die auch leicht parametrisiert werden können. Schon bei einer Leiterschicht, deren Leiterbahnen in 45° -Richtung angeordnet sind, entstehen Probleme bei der parametrischen Zuweisung der Materialeigenschaften. Hier können die Rechteckelemente in 2 Dreiecke "geteilt" werden. Bei ebenfalls in der Praxis eingesetzten Dehnungsmessstreifen mit 60° - bzw. 120° -Gitterschichten müssen die Elemente die in Abbildung 3.3 dargestellten Formen aufweisen. Wie schon oben erwähnt, müssen die übereinanderliegenden Schichten des Modelles identische

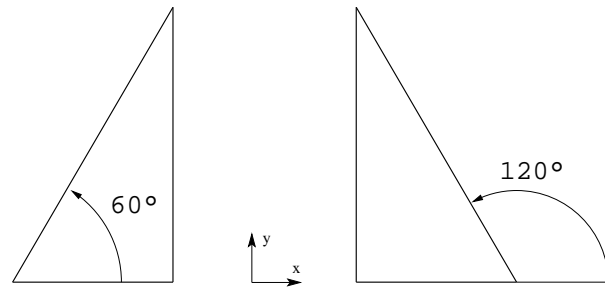


Abb. 3.3: Elemente zur Darstellung von verschieden gerichteten Messgitterschichten

Knoten- und Elementstrukturen aufweisen. Und genau in diesem Punkt ist schon in diesem Fall die Erfüllung dieser Bedingung mit den in Abbildung 3.3 dargestellten Elementformen nicht mehr möglich. Abhilfe würde hier eine Viertelteilung eines Rechteckelementes schaffen (Abb. 3.4

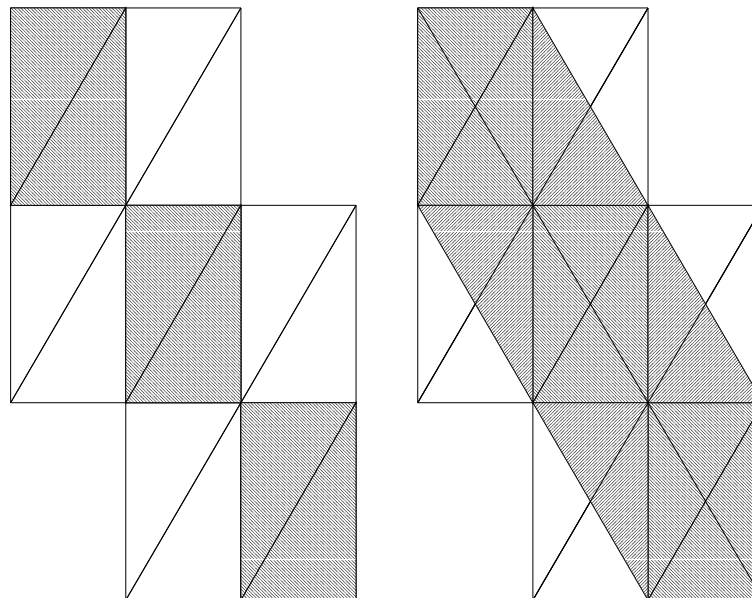


Abb. 3.4: Kombinationsmöglichkeiten von Elementen

rechts). Die Längenverhältnisse der Rechteckseitenlängen bestimmen dabei die Ausrichtung

der zu bildenden Elemente und damit die Richtungen der Konstantandrähte. Hiermit liessen sich waagerechte, senkrechte und zueinander symmetrische Stege realisieren. Die hierbei entstehende sehr große Anzahl von Elementen aufgrund der notwendigen Elementunterteilungen verhindern eine Realisierung. Um realistische DMS-Abmessungen von über 1 mm^2 Fläche zu erlangen, wären selbst schon ohne Unterteilung der Rechtecke zu viele Elemente entstanden. Aus diesen Gründen wurde von einer weiteren Untersuchung dieser Vorgehensweise abgesehen und nach alternativen Modellierungsmöglichkeiten gesucht.

3.2.3 3D-Modellierung mit orthotropen Mischschichten

Da bei der Nachbildung der einzelnen Leiter der Messgitterschichten schon bei kleinen DMS-Abmessungen sehr viele Elemente entstehen, ist eine Reduzierung der Elementanzahl unumgänglich. Deshalb wird in diesem Modell auf die exakte Modellierung der Leiterbahnen verzichtet. Dennoch müssen die durch diese Anordnungen entstehenden Materialeigenschaften abgebildet werden, um das Verhalten des DMS real simulieren zu können. Die Materialeigenschaften bei der parallelen Anordnung der Leiterbahnen sind in 3 orthogonalen Ebenen symmetrisch, d.h. man kann das Materialverhalten der Mischschichten mit orthotropen Materialkennwerten nachbilden. Die formalen Zusammenhänge des makromechanischen Schichtverhaltens sind äquivalent zu denen der Laminattheorie.

Das verallgemeinerte HOOKEsche Gesetz beschreibt die Zusammenhänge zwischen Spannungen und Dehnungen. In Tensorschreibweise ergibt sich bei Nichtberücksichtigung von Temperaturänderungen folgender Zusammenhang:

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \quad (3.1)$$

Hierbei ist E_{ijkl} die Elastizitäts- oder Steifigkeitsmatrix. Aufgelöst nach den Dehnungen ergibt sich folgender formelmässiger Zusammenhang zwischen Dehnungen und Spannungen:

$$\varepsilon_{kl} = N_{klij} \cdot \sigma_{ij} = (E_{ijkl})^{-1} \cdot \sigma_{ij} \quad (3.2)$$

Hierbei ist N_{klij} die Nachgiebigkeitsmatrix und kann durch Inversion der Steifigkeitsmatrix E_{ijkl} gewonnen werden. Steifigkeits- und Nachgiebigkeitsmatrizen haben im allgemeinen Fall 81 voneinander unabhängige Komponenten, die für die Beschreibung des Materialverhaltens zu ermitteln sind. Für orthotropes Material haben beide Tensoren nur noch 9 voneinander unabhängige Komponenten. Die Nachgiebigkeitsmatrix ist dabei in folgender Weise besetzt:

$$[N]_{orthotrop} = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & N_{13} & 0 & 0 & 0 \\ N_{12} & N_{22} & N_{23} & 0 & 0 & 0 \\ N_{13} & N_{23} & N_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{66} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Ersetzt man die Komponenten der Nachgiebigkeitsmatrix durch ihre äquivalenten elastischen Komponenten, also E-Moduli, Schubmoduli und Querkontraktionszahlen, so ergibt sich folgende Besetzung für orthotropes Material:

$$[N]_{orthotrop} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Aufgrund der Symmetrie beider Matrizen gilt:

$$\frac{\nu_{ij}}{E_i} = \frac{\nu_{ji}}{E_j} \quad \text{für } i, j = 1, 2, 3 \quad (3.5)$$

Es müssen also nur 3 der insgesamt 6 Querkontraktionszahlen bestimmt werden. Die Steifigkeitsmatrix $[E]$ für ein orthotropes Material ausgedrückt durch die elastischen Konstanten ergibt sich wie oben erwähnt durch Inversion der Nachgiebigkeitsmatrix $[N]$. Für die von Null verschiedenen Elemente E_{ij} der Steifigkeitsmatrix erhält man:

$$\left. \begin{aligned} E_{11} &= \frac{1 - \nu_{23}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} \\ E_{12} &= \frac{\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23}}{E_2 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{12} + \nu_{32}\nu_{13}}{E_1 E_3 \Delta} \\ E_{13} &= \frac{\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23}}{E_1 E_2 \Delta} \\ E_{22} &= \frac{1 - \nu_{13}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} \\ E_{23} &= \frac{\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{23} + \nu_{21}\nu_{13}}{E_1 E_2 \Delta} \\ E_{33} &= \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{E_1 E_2 \Delta} \\ E_{44} &= G_{23} \\ E_{55} &= G_{31} \\ E_{66} &= G_{21} \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

mit

$$\Delta = \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}}{E_1 E_2 E_3}$$

Diese Materialgesetze gelten bezüglich eines Hauptachsensystems. Für die Anwendung dieser Materialgesetze auf die verschieden orientierten Messgitterschichten müssen die Materialgesetze auf die Bezugskordinaten des Messgitters transformiert werden. Dabei fallen in allen Ebenen die Koordinatenachsen senkrecht zu den Messgitterebenen zusammen. Die Drehung erfolgt dementsprechend um diese Achse. In kurzer Form lautet die Transformation aus dem

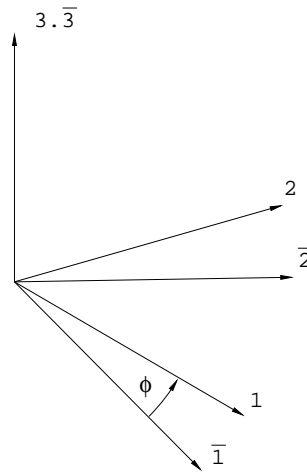


Abb. 3.5: Koordinatentransformation

globalen Koordinatensystem $(\bar{1}, \bar{2}, \bar{3})$ in das Material-Hauptachsensystem $(1, 2, 3)$:

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{T}} \underline{\underline{\bar{\sigma}}}. \tag{3.7}$$

Dabei ist $\underline{\underline{T}}$ die Transformationsmatrix zwischen den Koordinatensystemen. Sie ist folgendermassen besetzt:

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \varphi & \sin^2 \varphi & 0 & 0 & 0 & 2 \cos \varphi \sin \varphi \\ \sin^2 \varphi & \cos^2 \varphi & 0 & 0 & 0 & -2 \cos \varphi \sin \varphi \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ -\cos \varphi \sin \varphi & \cos \varphi \sin \varphi & 0 & 0 & 0 & \cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi \end{bmatrix} \tag{3.8}$$

Für das weitere Vorgehen wird davon ausgegangen, dass sich der Verbund aus Messgitter und Träger nach den Regeln der Laminattheorie verhält. Diese beinhaltet folgende Annahmen:

- Das Laminat ist dünn, d.h. die Schichtdicke h ist sehr viel kleiner als alle anderen Abmessungen,
- Es handelt sich um linear-elastisches Materialverhalten mit kleinen Dehnungen,

- Die einzelnen Faserschichten sind “perfekt“ miteinander verbunden, d.h. die Verschiebungen an den Schichtgrenzen sind kontinuierlich. Die einzelnen Schichten können also nicht gleiten. Das Laminat verhält sich demnach wie eine einzige homogene Schicht,
- Die Voraussetzungen der KIRCHHOFFSchen Plattentheorie wie die BERNOULLI-NAVIERsche Hypothese (ebene Querschnitte bleiben bei Belastung eben; Querschnitte bleiben bei Belastung senkrecht zur Plattenmittelfläche) sind gültig.

Die Ermittlung der elastischen Konstanten erfolgte nach [Erma 02]. Zu diesen zählen wie schon oben erwähnt E-Moduli, Schubmoduli und Querkontraktionszahlen. Die mechanischen Eigenschaften eines Verbundes hängen von den Volumenanteilen der verschiedenen Komponenten ab. Bei einem Volumen V eines Verbundwerkstoffes ist der Volumenanteil v_i der i -ten Komponente der Quotient aus Volumen V_i und dem Gesamtvolumen V :

$$v_i = \frac{V_i}{V} \quad (3.9)$$

Bei den Mischschichten des DMS-Messgitters werden die Anteile des Messgitters aus Konstantan v_{ko} und des Anteils aus Polyimid v_{pi} betrachtet. Bei einem idealen Verbund ohne Fehlvolumina ergibt die Summe aller Anteile natürlich 1:

$$v_{ko} + v_{pi} = 1 \quad (3.10)$$

Bei der Belastung der Mischschicht entlang der Richtung der verstärkend wirkenden Konstantan-Drähte und in genügend grossem Abstand von den Lastangriffszonen wird angenommen, daß die Dehnungen ε_{ko} der Konstantandrähte und ε_{pi} der Matrix aus Polyimid gleich der Dehnung des Verbundes ε_1 ist:

$$\varepsilon_{ko} = \varepsilon_{pi} = \varepsilon_1 \quad (3.11)$$

Bei Vernachlässigung unterschiedlicher Querdehnzahlen von Fasern und Matrix erhält man folgende Beziehungen für die Spannungen:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ko} &= E_{ko}\varepsilon_{ko} \\ \sigma_{pi} &= E_{pi}\varepsilon_{pi} \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

Die im Querschnitt mit der Fläche A wirkende mittlere Spannung σ_1 setzt sich aus mit den Teilflächeninhalten gewichteten Spannungen in den Konstantandrähten und im Polyimid-Verbund zusammen:

$$A\sigma_1 = A_{ko}\sigma_{ko} + A_{pi}\sigma_{pi}. \quad (3.13)$$

Der mittlere E-Modul des Verbundes wird nach dem HOOKEschem Gesetz zu

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} \quad (3.14)$$

berechnet. Durch Kombination der Gleichungen (3.13) und (3.14) kann der E-Modul des Verbundes in Abhängigkeit von den E-Modulen der Komponenten und ihrer Flächeninhalte angegeben werden:

$$E_1 = E_{ko} \frac{A_{ko}}{A} + E_{pi} \frac{A_{pi}}{A}. \quad (3.15)$$

Die Brüche geben die relativen Flächenanteile wieder, die die gleichen Werte aufweisen wie die Volumenanteile v_i , deren Summe immer den Wert Eins ergeben muss. Damit erhält die Mischungsregel ihre endgültige Form:

$$E_1 = E_{ko}v_{ko} + E_{pi} + v_{pi}. \tag{3.16}$$

Neben dem E-Modul E_1 können die Querkontraktionszahlen v_{12} und v_{13} nach der Mischungsregel und der Grundidee der parallel geschalteten Federn berechnet werden.

Zur Berechnung des E-Moduls in Querrichtung zu den Konstantandrähten wird vereinfachend davon ausgegangen, dass Konstantandrähte und Polyimid-Matrix wie Federn hintereinander geschaltet sind. Somit ist die Spannung σ_2 in allen Verbundkomponenten konstant und es stellt sich Dehnungen entsprechend den E-Modulen in Konstantan und Polyimid ein:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{ko} &= \frac{\sigma_2}{E_{ko}} \\ \varepsilon_{pi} &= \frac{\sigma_2}{E_{pi}} \end{aligned} \right\} \tag{3.17}$$

Die Gesamtdehnung ε_2 setzt sich aus den Dehnungen der Verbundkomponenten zusammen. Der Längenanteil der Komponenten entspricht dabei dem jeweiligen Volumenanteil v_i . Somit gilt:

$$\varepsilon_2 = v_{ko}\varepsilon_{ko} + v_{pi}\varepsilon_{pi} \Rightarrow \varepsilon_2 = v_{ko}\frac{\sigma_2}{E_{ko}} + v_{pi}\frac{\sigma_2}{E_{pi}}. \tag{3.18}$$

Eingesetzt in das HOOKEsche Gesetz ergibt sich für den Verbund:

$$E_2 = \frac{E_{ko}E_{pi}}{E_{ko}v_{ko} + E_{pi}v_{pi}} \tag{3.19}$$

Mit dieser Formel können äquivalent das E-Modul E_3 sowie die Schubmodule G_{23} , G_{13} und G_{12} berechnet werden.

Diese Modelle der Parallel- und Reihen-Schaltung von Federn beruhen auf groben Vereinfachungen. In Wirklichkeit sind die Verbundkomponenten nicht in dieser idealen Form angeordnet. In der Literatur wird daher auf andere Formeln verwiesen, die den Einfluss des Volumengehaltes der verstärkenden Faser besser beschreiben. Tatsächlich werden heutzutage die Formeln von C. C. Chamis [Cham 84] in der Raumfahrt als Standard betrachtet. Es folgt ein Überblick über die wichtigsten Formeln:

$$\left. \begin{aligned} E_{11} &= v_{ko}E_{ko} + v_{pi}E_{pi} \\ E_{22} &= \frac{E_{pi}}{1 - \sqrt{v_{ko}}\left(1 - \frac{E_{pi}}{E_{ko}}\right)} = E_{22} \\ G_{12} &= \frac{G_{pi}}{1 - \sqrt{v_{ko}}\left(1 - \frac{G_{pi}}{G_{ko}}\right)} = G_{13} = G_{23} \\ v_{12} &= v_{ko}v_{ko} + v_{pi}v_{pi} = v_{13} \\ v_{23} &= \frac{E_{22}}{2G_{23}} - 1 \end{aligned} \right\} \tag{3.20}$$

Für die Grundmaterialien Konstantan und Polyimid wird isotropes Werkstoffverhalten angenommen, d.h. in alle Werkstoffrichtungen haben die 3 Materialparameter E , G und ν gleiche Werte. Da jedoch nur 2 von ihnen voneinander unabhängig sind, lässt sich der in den obigen Formeln verwendete Schubmodul G aus den anderen beiden Materialparametern berechnen:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3.21)$$

Die Formelzusammenhänge wurden in das Eingabeskript für die Erstellung der Modelle in ANSYS eingearbeitet.

3.3 Auswertung der Simulationen

Für die beiden Grundmaterialien der DMS wurden die in Tabelle 3.1 aufgeführten Materialparameter verwendet. Sie wurden aus [Dubb 01] übernommen.

	Konstantan	Polyimid
<i>E-Modul</i> E [N/mm^2]	161000	3300
<i>Querkontraktionszahl</i> ν	0,33	0,41

Tab. 3.1: Übersicht der verwendeten isotropen Materialparameter

Für die Ermittlung der Materialeigenschaften des orthotropen Mischverbundes wurden exemplarisch gleich grosse Volumenanteile für Konstantan und Polyimid vorausgesetzt, so dass gilt:

$$\nu_{ko} = \nu_{pi} = 0.5. \quad (3.22)$$

Nun wurden die orthotropen Materialeigenschaften nach den in Abschnitt 3.2.3 aufgeführten Formeln (3.20) ermittelt. Dargestellt sind diese in Tabelle 3.2. Für die Erstellung der Modelle

	orthotrope Mischschicht
E_{11} [N/mm^2]	82150
$E_{22} = E_{33}$ [N/mm^2]	10736
$G_{12} = G_{13} = G_{23}$ [N/mm^2]	3817
$\nu_{12} = \nu_{13}$	0,37
ν_{23}	0,41

Tab. 3.2: Übersicht der verwendeten orthotropen Materialparameter

werden diese Materialkonstanten in 2 Materialmodelle eingebaut. Dies sind zum einen die 2 Materialkonstanten für die isotropen Polyimidschichten, die bereits in Tabelle 3.1 aufgelistet sind. Zum zweiten sind dies die das orthotrope Materialverhalten der Mischschichten beschreibenden Parameter, die in Tabelle 3.2 aufgelistet sind.

Die verwendeten Elementformen konnten sehr einfach gewählt werden. Kubische Elemente waren für diese Modellierung ausreichend. Somit entstanden entscheidend weniger Elemente pro Ebene als bei der direkten Modellierung der Konstantan-Leiterbahnen in Abschnitt 3.2.2. In ANSYS kommen hierbei die Solid64-Elemente mit 8 Knoten pro Element zum Einsatz.

Bei der Festlegung der Richtungen der Leiterbahnen in den verschiedenen Ebenen des Dehnungsmessstreifen müssen verschiedene Schritte gegangen werden. Für die verschiedenen Richtungen werden lokale Koordinatensysteme eingeführt, deren x-Achsen jeweils parallel zu den verschiedenen Richtungen der Konstantandrähte festgelegt werden. Diese sind einerseits zur Festlegung der lokalen Knoten- und Elementkoordinatensysteme als auch zur Auswertung der Verschiebungszustände nach der Rechnung notwendig.

Zur Festlegung der Schichtdicken wurden für die Rechnungen Standardwerte herangezogen, die die Dickenverhältnisse in realen Dehnungsmessstreifen gut widerspiegeln. Die in der Modellierung verwendeten Schichten und ihre Dicken sind in Tabelle 3.3 dargestellt. Aus Gründen der Modellgrösse ist ebenso wie in Abschnitt 3.2.2 auf eine Abdeckung der letzten Mischschicht verzichtet worden. So wurde insgesamt eine Höhe von $59\mu\text{m}$ erreicht.

	Schichtdicke [μm]	Materialien
<i>Grundschrift</i>	30	Polyimid
<i>Mischschicht</i>	3	Polyimid, Konstantan
<i>Zwischenschicht</i>	10	Polyimid

Tab. 3.3: Dicken und Materialien der Schichten

Für die Modellierung wurde ein Modell mit folgendem Schichtaufbau gewählt:

1. Grundschrift (isotrop)
2. Mischschicht (orthotrop: 0°) - Ebene 1
3. Zwischenschicht (isotrop)
4. Mischschicht (orthotrop: 90°) - Ebene 2
5. Zwischenschicht (isotrop)
6. Mischschicht (orthotrop: 45°) - Ebene 3

Es wurden Rechnungen mit verschiedenen Abmessungen des Dehnungsmessstreifens durchgeführt. Die in dieser Konfiguration durchführbaren Berechnungen beschränken sich auf eine DMS-Grösse von etwa $3 \cdot 3\text{mm}$. Bei dieser Grösse ist die maximal mögliche Elementanzahl in der zur Verfügung stehenden ANSYS-Version erreicht.

Um ein gleichmässiges Verschiebungsfeld an der Unterseite des Dehnungsmessstreifens aufzubringen, wurden in beide Richtungen der DMS-Unterfläche eine lineare Verschiebung aufgegeben, die einer konstanten Dehnung ε_0 entsprach. Dazu werden alle Knoten der Unterfläche selektiert und ihnen in Abhängigkeit ihrer jeweiligen x- bzw. y- Koordinate eine Verschiebung

zugewiesen.

$$\left. \begin{aligned} u_x &= C_\varepsilon \cdot k_x \\ u_y &= C_\varepsilon \cdot k_y \\ u_z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.23)$$

Hierbei sind k_x bzw. k_y die Koordinaten in x- bzw. y-Richtung der betroffenen Knoten. C_ε ist hierbei die Konstante, die den Betrag der konstanten Dehnung festlegt. Desweiteren werden bei gleicher Knotenauswahl die Verschiebungen senkrecht zur Unterfläche des DMS in z-Richtung zu Null gesetzt.

Herausgefunden werden sollen in Abhängigkeit von der Modellgröße die Verläufe der relativen Dehnungen $\varepsilon/\varepsilon_0$. Jeweils in Richtung der in der Ebene verlaufenden Konstantandrähte wurden dazu Auswertungspfade parallel zu den Gitterrichtungen angelegt. In Abbildung 3.6

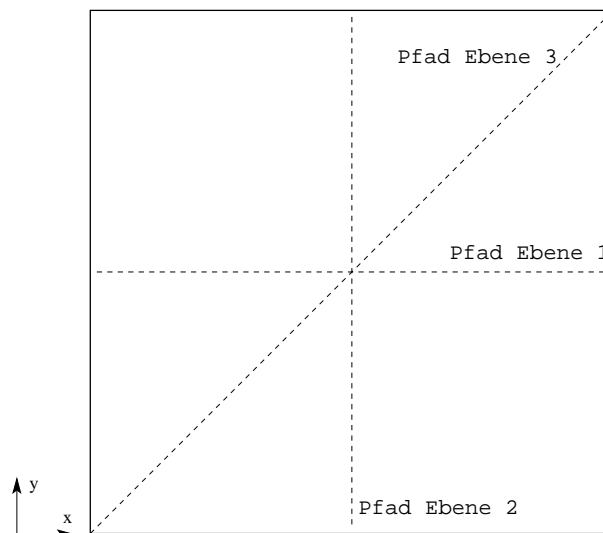


Abb. 3.6: Pfade im Modell zur Dehnungsauswertung

ist die Lage der Pfade dargestellt. Alle Pfade liegen jeweils mittig im Dehnungsmessstreifen. Für den Pfad in Ebene 3 wird ein längerer Auswertungspfad durch die Mitte des DMS gelegt. Dessen Länge muss bei der Auswertung auf das Längenmass der Pfade für Ebene 1 und 2 herunterskaliert werden.

Entlang dieser Pfade wurden in den jeweiligen Knotenkoordinaten die elastischen Gesamtdehnungen ε_x in x-Richtung ausgewertet. Bezogen auf die aufgebrauchte Vergleichsdehnung ε_0 sind diese Dehnungen für die 3 Ebenen in den Abbildungen 3.7, 3.8 und 3.9 dargestellt. Eingezeichnet sind jeweils die relativen Verläufe der Dehnungen entlang der Pfade der 3 untersuchten unterschiedlich grossen Modelle 1, 2 und 3. Die untersuchten Modellgrößen mit ihren Element- und Knotenanzahlen sind in Tabelle 3.4 dargestellt.

Bei den Grössenvergleichen in den einzelnen Ebenen werden die Veränderungen der Dehnungsübertragung am anschaulichsten dargestellt. Beim kleinsten Modell 1 (innere Kurven in den Abbildungen 3.7 bis 3.9) werden in allen Ebenen nur etwa 84% (Ebene 3) bis 88% (Ebene 1) der Dehnungen in der Mitte des Modells maximal übertragen. Das Modell 2 (mittlere

	Abmessungen [$mm \cdot mm$]	Elemente	Knoten
<i>Modell 1</i>	0,694 · 0,694	4375	5488
<i>Modell 2</i>	1,388 · 1,388	18150	21952
<i>Modell 3</i>	2,975 · 2,975	84966	100800

Tab. 3.4: Modellparameter

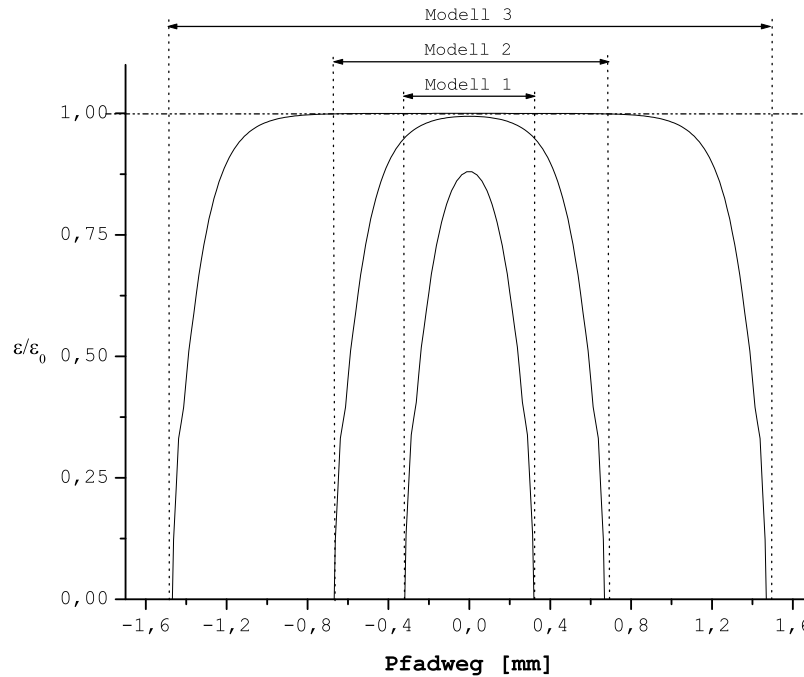


Abb. 3.7: Dehnungsübertragung in Ebene 1

Kurven) erreicht hingegen schon etwa 99% Dehnungsübertragung in allen 3 Ebenen. Diese maximale Übertragung kommt allerdings wie schon in Modell 1 nur punktuell in der Mitte des Dehnungsmessstreifens zustande. Den maximalen Wert der Dehnungsübertragung erreicht das Modell 3 mit einer Kantenlänge von 2,975mm auf etwa 1,6mm Länge, was einem prozentualen Anteil von etwa 54% entspricht.

In allen Kurven besitzen die Anstiegsgeraden der relativen Dehnungsübertragung gleiche Anstiegswerte, d.h. der Anstieg der Dehnungsübertragung ist auf dem Weg vom Rand in Richtung Mittelpunkt des DMS stets gleich. Aus diesem Zusammenhang lassen sich aus den entstandenen Kurven beliebig viele Zwischenkurven für andere DMS-Seitenlängen inter- und extrapolieren. Die Anstiege dieser Geraden bestimmten demzufolge die Größe der Einlaufzone des jeweiligen Modells. In allen Modellen waren die Einlaufzonen in der Summe etwa 1,3mm lang. Bei ansteigenden Kantenlängen bleibt der Anteil der Einlaufzonen konstant, so daß der prozentuale Anteil der maximalen Dehnungsübertragung zunimmt.

Die Unterschiede zwischen den 3 Ebenen sind aufgrund der räumlichen Nähe der Ebenen

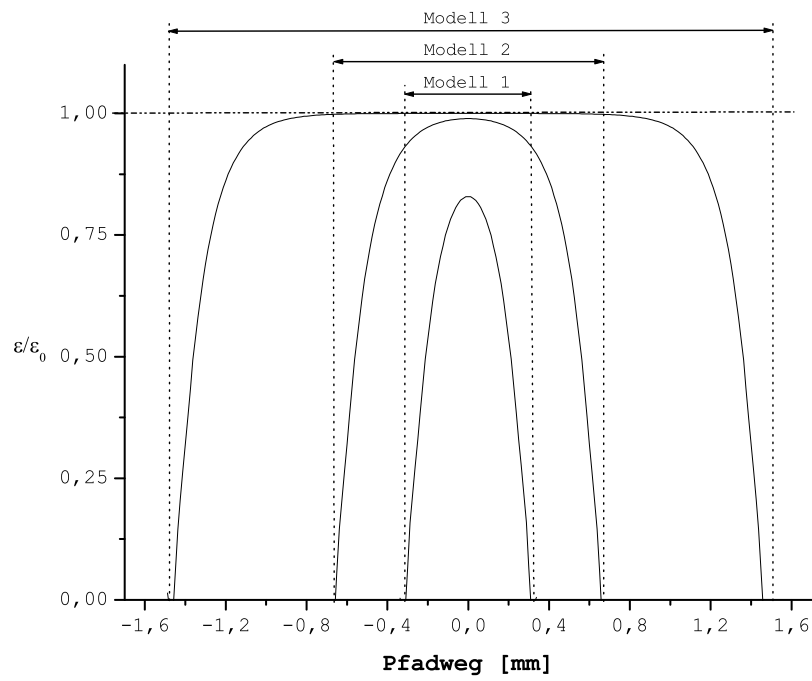


Abb. 3.8: Dehnungsübertragung in Ebene 2

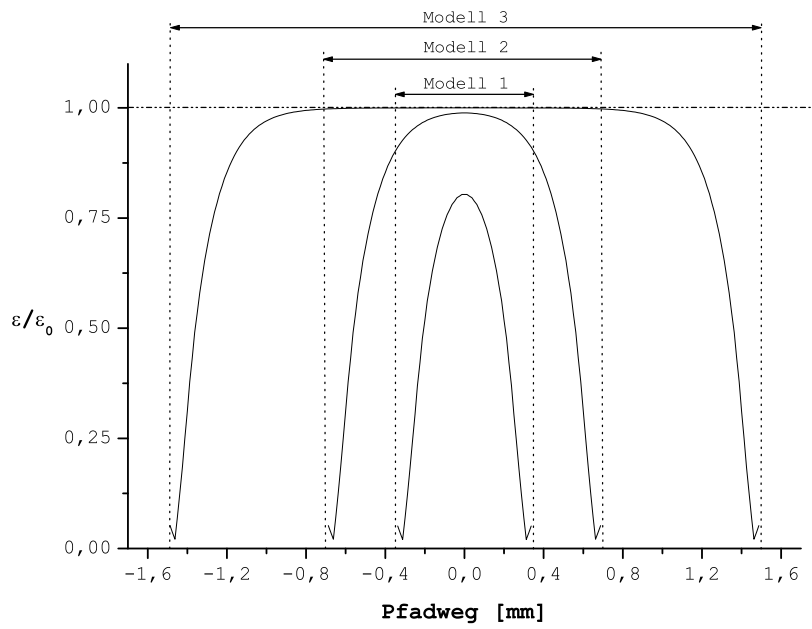


Abb. 3.9: Dehnungsübertragung in Ebene 3

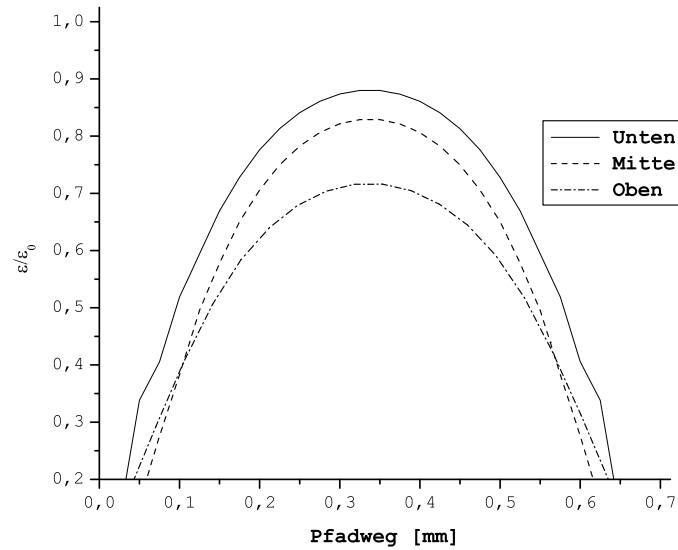


Abb. 3.10: Dehnungsübertragung; Modell 1; Kantenlänge 0,69mm

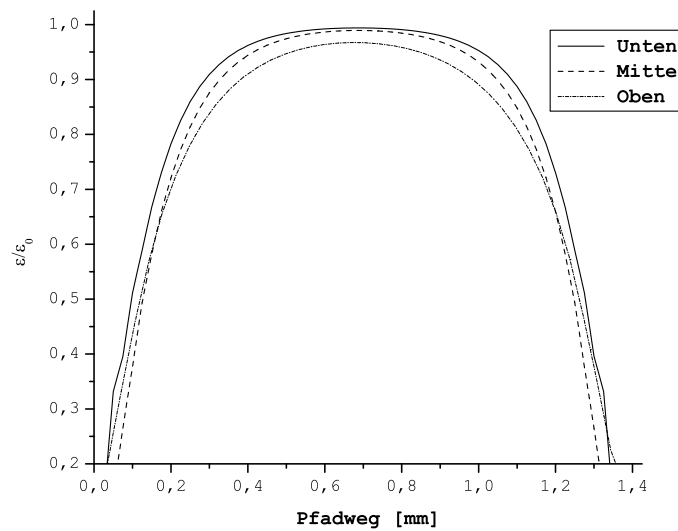


Abb. 3.11: Dehnungsübertragung; Modell 2; Kantenlänge 1,39mm

erwartungsgemäss nur sehr gering. Für einen direkten Vergleich der relativen Dehnungsübertragungen in den Modellen sind in den Abbildungen 3.10 bis 3.12 die Dehnungsübertragungen für jeweils ein Modell dargestellt.

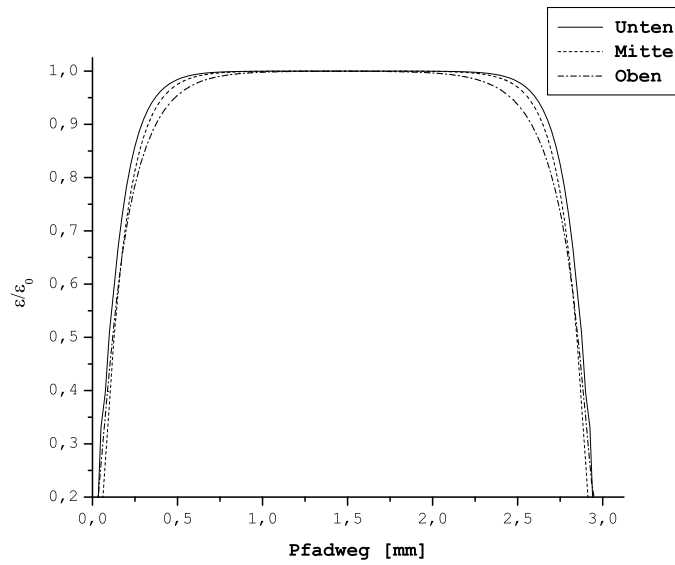


Abb. 3.12: Dehnungsübertragung; Modell 3; Kantenlänge 2,98mm

Kapitel 4

Experimentelle Untersuchungen

Für die Verifizierung numerischer Simulationen sind äquivalente experimentelle Untersuchungen zwingend erforderlich. Sie werden direkt am zu untersuchenden Objekt durchgeführt, so dass die entstehenden Versuchsergebnisse Anhaltspunkte und wichtige Vergleichswerte zu den numerischen Simulationen liefern.

In dieser Arbeit sollen die im vorigen Kapitel beschriebenen numerischen Untersuchungen verifiziert werden. Es sollte experimentell herausgefunden werden, in welchem Umfang die an der DMS-Unterseite aufgebrauchte Dehnung in die übereinanderliegenden Messgitterschichten übertragen wird. Desweiteren sollte mit Hilfe des Verfahrens der Thermographie die Wärmeausbreitung in einer DMS-Rosette visualisiert werden.

4.1 Dehnungsübertragung in einer DMS-Rosette

Die an der DMS-Unterseite aufgebrauchten Dehnungen werden durch die übereinanderliegenden Schichten des DMS übertragen. Ziel dieser experimentellen Untersuchungen sollte es sein, die in den übereinanderliegenden Messgitterschichten auftretenden Dehnungen zu ermitteln.

4.1.1 Experimenteller Aufbau

Die Messung der Dehnungen in den 3 Messgitterschichten soll gleichzeitig erfolgen. Dazu ist eine Präparation von 3 DMS-Rosetten auf einem Zugstab wie in Abbildung 4.1 notwendig. Eingesetzt wurde ein ungehärteter Dehnstab mit einer Breite von 10mm und einer Dicke von 2mm im Dehnungsbereich. Ausgewählt wurden DMS mit kleinen Messgitterlängen und somit

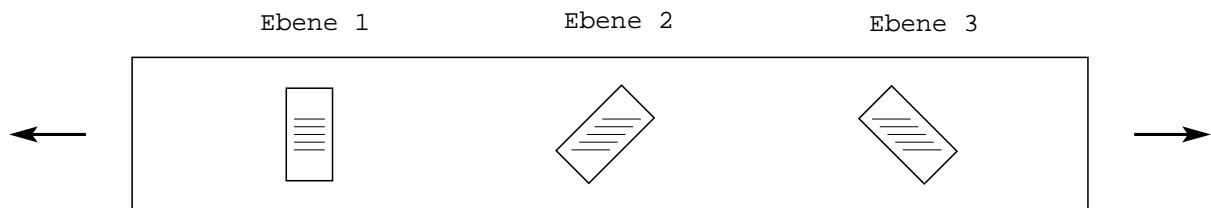


Abb. 4.1: Applikation der DMS-Rosetten auf dem Dehnstab

kleinen äusseren Abmessungen. Gründe für deren Einsatz lagen in den Erkenntnissen, die in den numerischen Untersuchungen gewonnen wurden. Dabei waren die Dehnungsübertragungen bei

kleinen Messgitterlängen wesentlich geringer als bei grösseren Abmessungen. Die technischen Daten der verwendeten DMS sind in Tabelle 4.1 aufgelistet. Eine stark vergrösserte Darstellung des Dehnungsmessstreifens ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

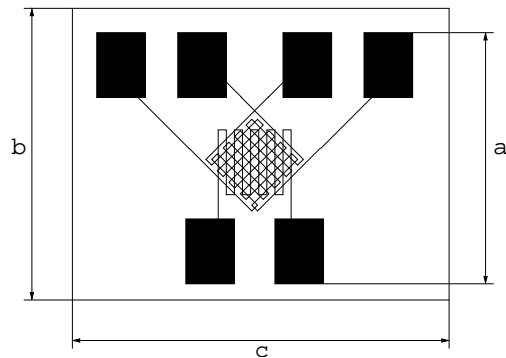


Abb. 4.2: Darstellung der DMS-Rosette von BLH

<i>Hersteller</i>	BLH SR-4
<i>Typ</i>	FSEX3-03-12-S6E6
<i>Gitterlänge</i>	0,76 mm
<i>Gesamtlänge (a)</i>	3,18 mm
<i>Gitterbreite</i>	0,75 mm
<i>Matrixlänge (b)</i>	4,30 mm
<i>Matrixbreite (c)</i>	4,80 mm
<i>Widerstand</i>	$(129 \pm 0,5\%) \Omega$
<i>k-Faktor</i>	$1,99 \pm 2,0\%$

Tab. 4.1: Technische Daten

Alle Dehnungsmessstreifen wurden unter dem Mikroskop entsprechend ihrer Messgitterrichtung auf dem Zugstab ausgerichtet und fixiert. Das flächige Aufkleben der DMS und der Lötstützpunkte erfolgte mit Epoxydharz in 2 aufeinanderfolgenden Arbeitsdurchgängen.

Jeder DMS wurde separat an einen eigenen Messkanal des Messverstärkers *MGCPPlus* von HBM betrieben. Dabei wurden die DMS als Viertelbrücke in Vierleitertechnik angeschlossen. Für die Versuche wurde eine Brückenspeisespannung von 2,5V verwendet. Die Auswertung und Anzeige erfolgte PC-unterstützt mittels der von HBM vertriebenen Auswertungssoftware *catman* in der Version 4.0.

4.1.2 Durchführung

Für die Durchführung der Zugversuche wurde eine Prüfmaschine der Firma UTS eingesetzt. Diese ermöglicht Zug- und Druckversuche mit einer maximalen Prüfkraft von 100kN und Traversengeschwindigkeiten von 0,001...500mm/min.

Die durchzuführenden Versuche sollen im Zugstab Dehnungen im elastischen Bereich hervorrufen, also nach Entlasten des Zugstabes sollen die Dehnungen wieder komplett verschwinden. Für die Ermittlung des dabei zu fahrenden Traversenweges wurde ein geometrisch identischer, allerdings unpräparierter Zugstab eingesetzt. Ermittelt wurde ein Traversenweg von 0,5mm, bei dem vertretbare elastische Dehnungen im Zugstab auftraten.

Am präparierten Zugstab wurden mehrere identische Versuchsdurchgänge mit dem oben ermittelten Traversenweg von 0,5mm gefahren. Bei einer an der Zugmaschine vorgegebenen Traversengeschwindigkeit von 0,2mm/min dauerte der Be- und Entlastungszyklus 300s.

4.1.3 Ergebnisse

Der bei den Versuchen entstandene Kraft-Weg-Verlauf an der Prüfmaschine die Be- und Entlastungskurve. Der beim ersten Versuch aufgetretene Verlauf ist in Abb. 4.3 dargestellt. Dabei

entstanden bei der vorgegebenen Zuglänge von $0,5\text{mm}$ maximale Zugkräfte von etwa 7200N . Bei nachfolgenden Versuchen verschob sich der Maximalwert der gemessenen Zugkraft nur leicht nach oben.

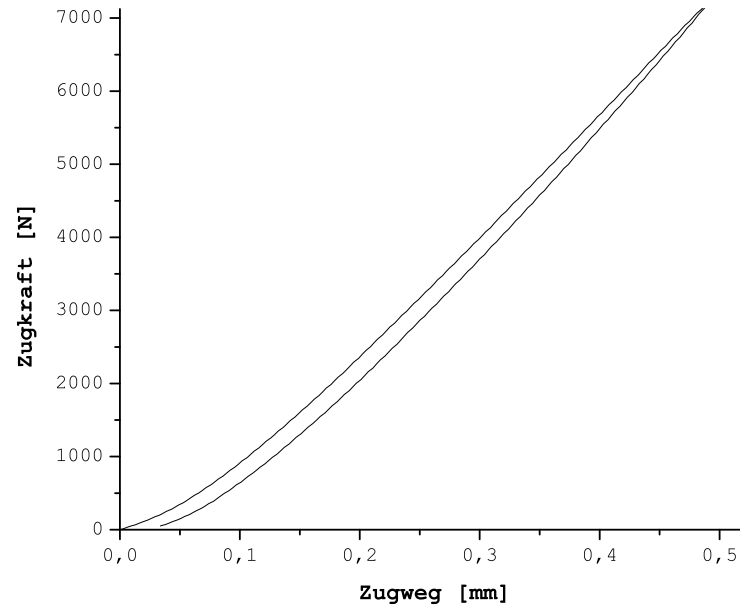


Abb. 4.3: Kraft-Weg-Verlauf des Zugstabes

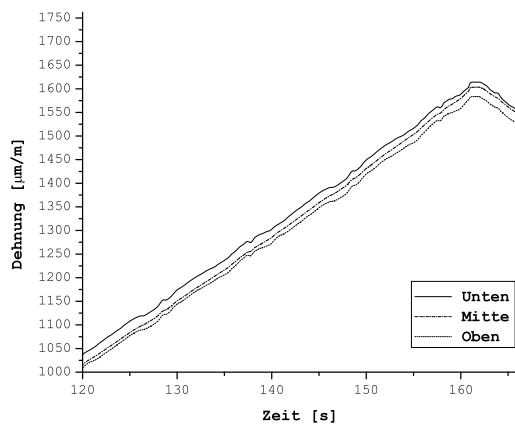


Abb. 4.4: Dehnungsverlauf; Zugweg $0,5\text{mm}$; Lauf 1

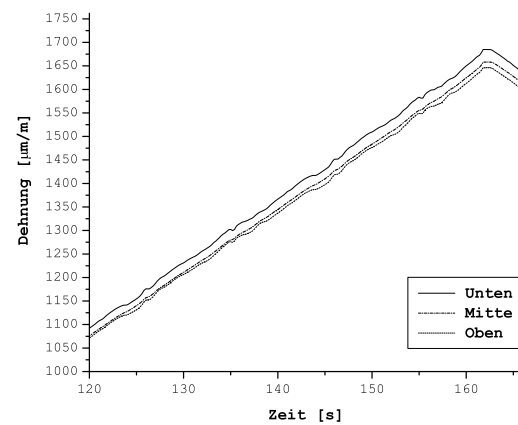


Abb. 4.5: Dehnungsverlauf; Zugweg $0,5\text{mm}$; Lauf 2

In allen Versuchen traten zwei Erscheinungen ganz besonders hervor. Zum einen traten in den unteren Belastungsbereichen vertauschte Dehnungskurven auf, d.h. die oberste Schicht (Ebene 3) wies die grössten Dehnungen auf und die unterste Schicht (Ebene 1) die kleinsten Dehnungen. Die zweite Erscheinung trat nur auf den ersten Mikrometern des Traversenweges

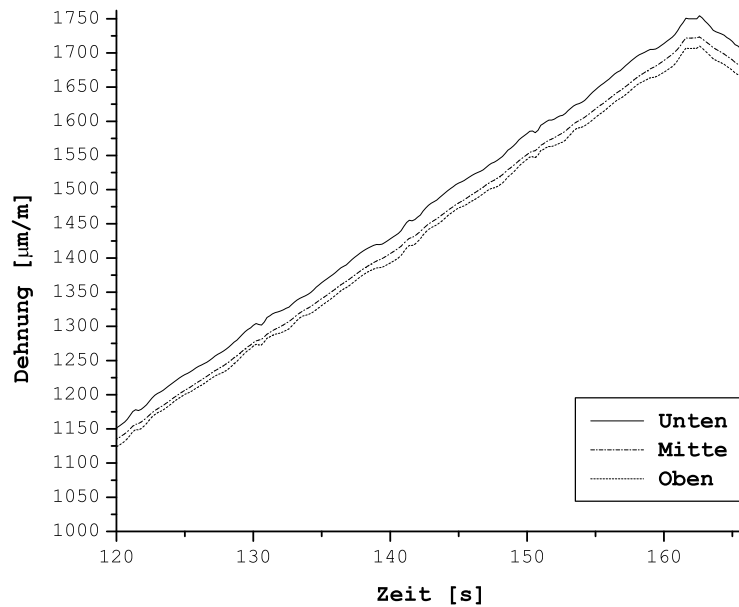


Abb. 4.6: Dehnungsverlauf; Zugweg 0,5mm; Lauf 3

Lauf	Unten		Mitte		Oben	
	$\epsilon[\mu\text{m}/\text{m}]$	$\epsilon_{rel}[\%]$	$\epsilon[\mu\text{m}/\text{m}]$	$\epsilon_{rel}[\%]$	$\epsilon[\mu\text{m}/\text{m}]$	$\epsilon_{rel}[\%]$
1	1614	100	1603	99,3	1584	98,1
2	1685	100	1658	98,4	1646	97,7
3	1754	100	1723	98,2	1710	97,5

Tab. 4.2: Zugversuche; max. Dehnungen

auf. Hier erreichten die gemessenen Dehnungen negative Werte, d.h. das Bauteil stand unter Druckbelastung und wurde demzufolge gestaucht.

Erst nach etwa 50% des Traversenweges stellte sich die zu erwartende Reihenfolge der Dehnungswerte in den DMS-Rosetten ein. In diesen Bereichen höherer Belastungen überwogen die Anteile der durch die Prüfmaschine hervorgerufenen Dehnungen im Zugstab. Diese "Grenze" verschob sich bei den 3 Versuchen leicht nach oben. Diese oben genannten Erscheinungen lassen auf einen konstanten Stör-Anteil im Zugstab schließen. Dieser ungewollte Anteil kann verschiedene Ursachen haben. Eine mögliche Ursache ist die schwierig zu realisierende exakte Beaufschlagung des Zugstabes mit einem reinen Dehnungsfeld. Störend können Versätze der Zugpunkte der oberen und unteren Einspannpunkte wirken.

Ein weiterer Effekt war stets im ersten Abschnitt des Traversenweges zu beobachten. Die Dehnungsverläufe zeigten auf den ersten Mikrometern des Traversenweges sinusähnliche Formen mit sehr geringen Amplituden. Diese Erscheinungen lassen auf folgenden Vorgang schließen. Der im Ursprungszustand nie vollkommen gerade Zugstab wellt sich bei den ersten Bela-

stungen aus. In allen Ebenen treten dabei ähnliche Dehnungsverläufe auf. Erst nach dem Durchlaufen dieses Bereiches begann die eigentliche Dehnung des Zugstabes.

In den 3 Läufen des Zugversuches ergaben sich die in Tabelle 4.2 dargestellten Dehnungsmaxima. Dargestellt sind gleichzeitig die relativen Vergleichswerte der Dehnungen innerhalb eines Laufes zwischen den Schichten der DMS-Rosetten. Dabei steigerten sich die maximalen Dehnungen zwischen den Läufen jeweils um etwa 4%, was durch Setzungsvorgänge zu erklären ist. Dieser Effekt trat in allen Ebenen der DMS-Rosetten auf. Die prozentualen Abfälle der Dehnungen in den übereinanderliegenden Messgitterschichten der DMS-Rosetten liegen zwischen 1% und 2,5%.

4.2 Untersuchung der Wärmeausbreitung mittels Thermographie

Die Widerstandserwärmung beim Stromdurchfluss eines elektrischen Leiters führt zu einer Änderung der mechanischen Eigenschaften des Leitermaterials. Dabei spielt die Wärmeausbreitung und der Wärmeabtransport durch angrenzende Materialien eine wesentliche Rolle. Beeinflussende Faktoren sind die thermischen Materialkonstanten der verwendeten Materialien. Zur Ermittlung des thermischen Verhaltens sollen thermographische Aufnahmen dienen.

4.2.1 Das Verfahren der Thermographie

Die Thermographie beruht auf dem Prinzip der charakteristischen Abgabe elektromagnetischer Strahlung von Körpern aufgrund ihrer Temperatur. Nach dem Planck'schen Strahlungsgesetz besitzt ein idealer schwarzer Körper in Abhängigkeit von seiner Temperatur eine charakteristische spektrale Strahlungsdichte. Die Gesamtemission eines schwarzen Körpers berechnet sich nach dem Stefan-Boltzmannschem Gesetz zu

$$q = \sigma \cdot T^4 \quad (4.1)$$

berechnen, wobei σ die Stefan-Boltzmannschen Konstante mit $\sigma = 5,67 \cdot 10^8 \text{ W/m}^2$ ist. In der Natur gibt es jedoch keine idealen schwarzen Körper, so daß die um den Emissionsgrad ε abgeminderte Form des Stefan-Boltzmannschen Gesetzes zu

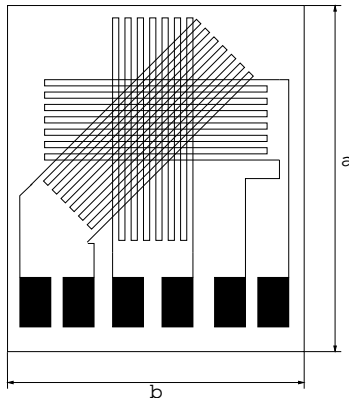
$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (4.2)$$

entsteht.

4.2.2 Experimenteller Aufbau

Für die thermographischen Aufnahmen stand eine Thermographiekamera Thermovision 900 der Firma AGEMA mit PC-Auswertungssystem zur Verfügung. Diese bietet die Möglichkeit, spektrale Wärmeverteilungen an Oberflächen von Bauteilen im Bereich von -30°C - 1500°C aufzunehmen. Dies geschieht mit nur geringer Zeitverzögerung bei einer Bildfrequenz von 15Hz pro Vollbild. Das aufgenommene Bild besteht aus 136 Zeilen und 272 Abtastwerte pro Zeile. Für die eingebaute Optik mit $10 - 20^\circ$ Öffnungswinkel ist ein bestimmter Mindestabstand für scharfe Thermographiebilder erforderlich.

Für diese Experimente wurden aufgrund des Mindestabstandes zur Kamera Dehnungsmessstreifen mit besonders großen Abmessungen benötigt. Der Aufbau und die technischen Daten der eingesetzten Dehnungsmessstreifen sind in Tabelle 4.3 und Abbildung 4.7 dargestellt. Diese



<i>Hersteller</i>	HBM Messtechnik GmbH
<i>Typ</i>	1-RY-91-6/120
<i>Gitterlänge</i>	6 mm
<i>Gesamtlänge (a)</i>	11 mm
<i>Gitterbreite</i>	2,5 mm
<i>Gesamtbreite (b)</i>	12,5 mm
<i>Widerstand</i>	$(120 \pm 0,5\%) \Omega$
<i>k-Faktor</i>	$2,09 \pm 1,0\%$

Abb. 4.7: Darstellung der DMS-Rosette von HBM

Tab. 4.3: Technische Daten

DMS wurden auf 2 Bauteilen aus unterschiedlichen Materialien appliziert. Ausgewählt wurden zum einen Epoxidharz und zum anderen Stahl. Diese Materialien besitzen stark voneinander abweichende Wärmeleitkoeffizienten (Tab. 4.4) [Dubb 01], so daß die somit entstehenden unterschiedlichen Wärmebilder einen guten Aufschluß über die Wärmeentstehung und -ableitung geben. Es wurden mehrere Versuchsreihen mit unterschiedlichen Speisespannungen im Bereich

Material	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
<i>Epoxidharz</i>	0,40...0,80
<i>Stahl</i>	47...58

Tab. 4.4: Wärmeleitkoeffizienten

von 0,5V bis 2,5V beim Bauteil aus Epoxidharz bzw. 5V beim Bauteil aus Stahl durchgeführt.

4.2.3 Ergebnisse

In den ersten Versuchen wurden alle 3 DMS-Schichten an die Speisespannung angeschlossen. In den Abbildungen 4.8 und 4.9 sind die Thermographiebilder der DMS-Rosetten auf den beiden Bauteilen bei einer Speisespannung von 2V dargestellt. Während sich der DMS auf dem Bauteil aus Epoxidharz von etwa 25°C auf bis zu 49°C erwärmt, ist auf dem Stahl-Bauteil lediglich eine Erwärmung auf nur etwa 29°C zu beobachten. Zurückzuführen sind diese stark voneinander abweichenden Erwärmungen auf die um den Faktor 250 höhere Wärmeleitfähigkeit des Stahl-Bauteils. Ebenfalls resultierend aus der guten Wärmeableitung sind die in Abbildung 4.9 erkennbaren Konturen der einzelnen DMS-Schichten. Dementsprechend sind aufgrund der Wärmeisolation des Epoxidharz-Bauteiles diese Konturen nicht erkennbar. Hier ist nur eine kreisförmige Erwärmungszone um den Mittelpunkt der DMS-Gitterschichten zu beobachten. Die Erwärmungszone reicht dabei über die Ausdehnung des Messgitters hinaus.

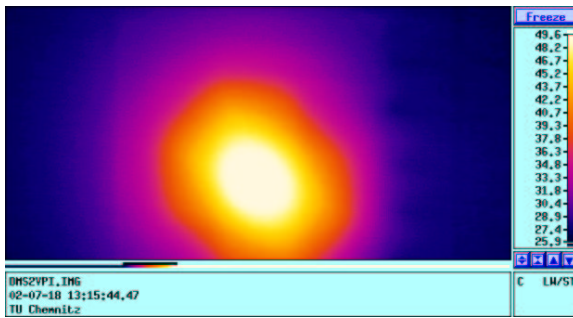


Abb. 4.8: DMS: 3 Schichten; Bauteil: Epoxidharz; Speisespannung: 2,00V

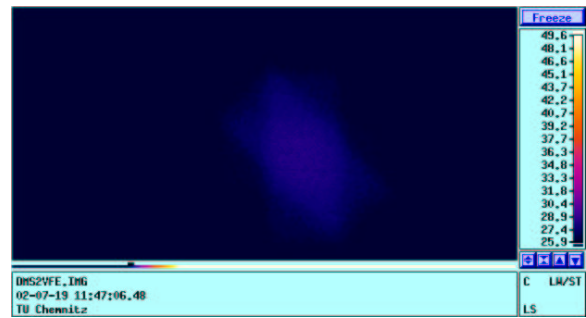


Abb. 4.9: DMS: 3 Schichten; Bauteil: Stahl; Speisespannung: 2,00V

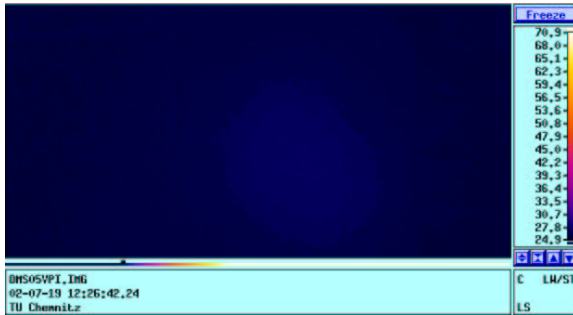


Abb. 4.10: DMS: 3 Schichten; Bauteil: Epoxidharz; Speisespannung: 0,50V

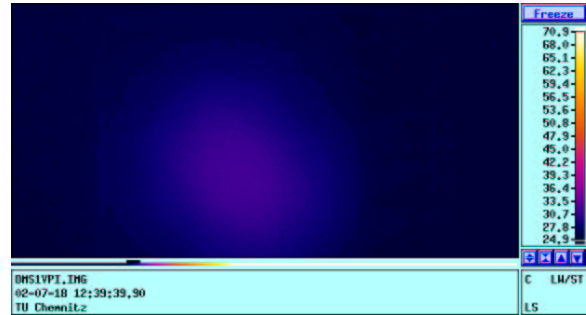


Abb. 4.11: DMS: 3 Schichten; Bauteil: Epoxidharz; Speisespannung: 1,00V

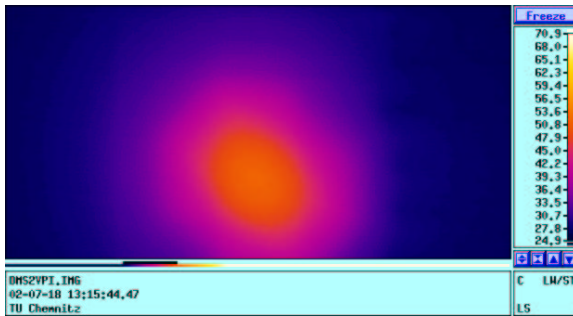


Abb. 4.12: DMS: 3 Schichten; Bauteil: Epoxidharz; Speisespannung: 2,00V

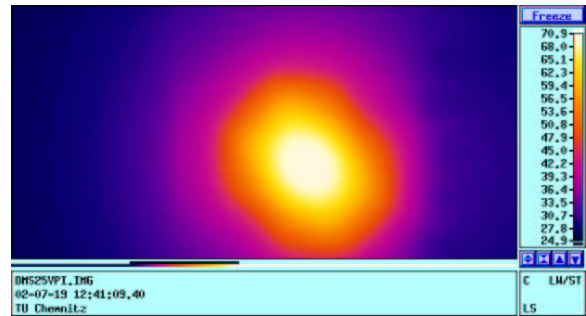


Abb. 4.13: DMS: 3 Schichten; Bauteil: Epoxidharz; Speisespannung: 2,50V

In den Abbildungen 4.10 bis 4.13 sind für eine Reihe von Speisespannungen Thermographiebilder der Wärmeentwicklung dargestellt. Zu erkennen sind bei allen Speisespannungen kreisförmige Erwärmungszonen um das Zentrum des DMS herum. Während die Höchsttemperatur bei 0,5V lediglich $27,5^{\circ}\text{C}$ beträgt, sind es bei 1V bereits $31,8^{\circ}\text{C}$, bei 2V schon $49,6^{\circ}\text{C}$ und bei 2,5V wird eine Höchsttemperatur von $70,9^{\circ}\text{C}$ erreicht. Aufgrund dieser enormen Temperatursteigerungen wurde auf eine Untersuchung bei einer Speisespannung von 5V verzichtet.

Diese selten angelegte Speisespannung wurde lediglich bei dem auf dem Stahl-Träger applizierten DMS zur Anwendung gebracht. Das dabei entstandene Thermographiebild ist in Abb. 4.14 dargestellt. Dabei erwärmt sich der DMS auf eine Höchsttemperatur von etwa 44°C . Dabei erkennbar sind die sich deutlich voneinander abhebenden Schichten des DMS und die äußeren

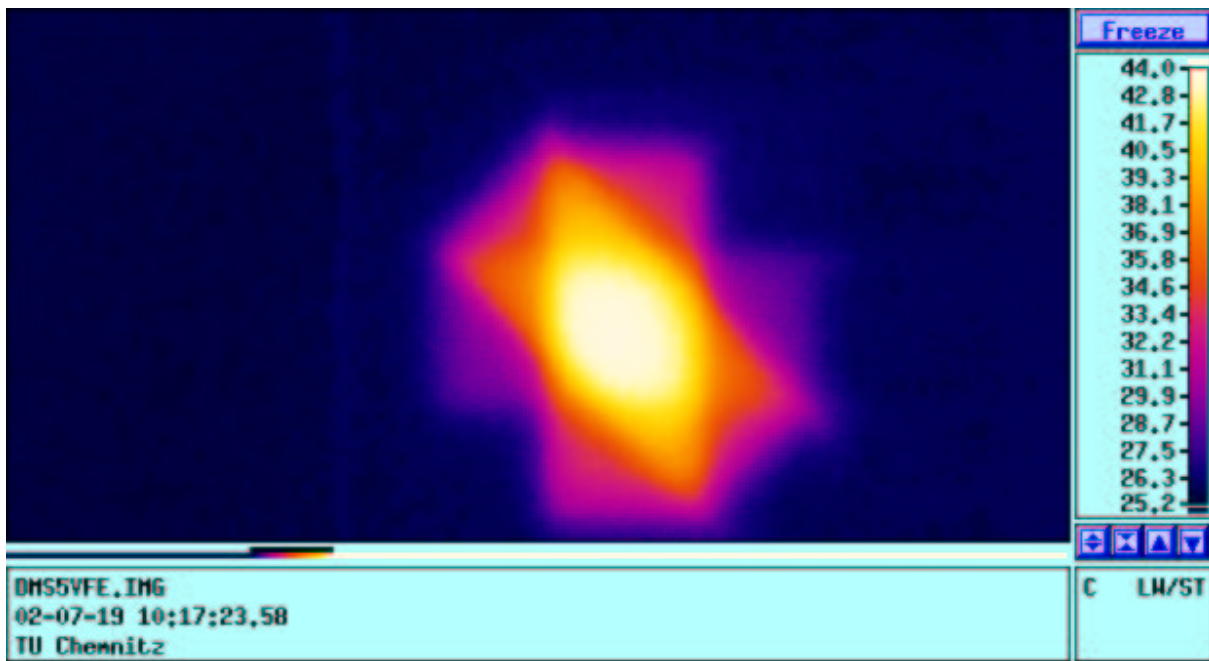


Abb. 4.14: DMS: 3 Schichten; Bauteil: Stahl; Speisespannung: 5,00V

Konturen der einzelnen Gitter. Ebenso zu erkennen sind die Reihenfolge der Anordnung der einzelnen Schichten. Die unterste Schicht, welche in der Abbildung waagrecht angeordnet ist, zeigt die geringste Erwärmung (etwa 30°C) aller 3 Schichten. Diese Schicht liegt örtlich am nächsten zum Stahl-Träger, welcher einen großen Anteil der entstehenden Wärmemenge dieser Schicht ableitet. Die zwischen den einzelnen Messgitterschichten liegenden Polyimid-Schichten schirmen aufgrund ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit die oberen beiden Schichten mehr und mehr ab. Diese können somit ihre entstehenden Wärmemengen somit nur zu geringeren Prozentsätzen an das Stahl-Bauteil abgeben. So erreicht die mittlere Schicht eine Höchsttemperatur von etwa 32°C und die oberste Schicht von etwa 34°C in den Zonen, wo sie nicht mit anderen Gitterschichten direkt übereinander angeordnet sind.

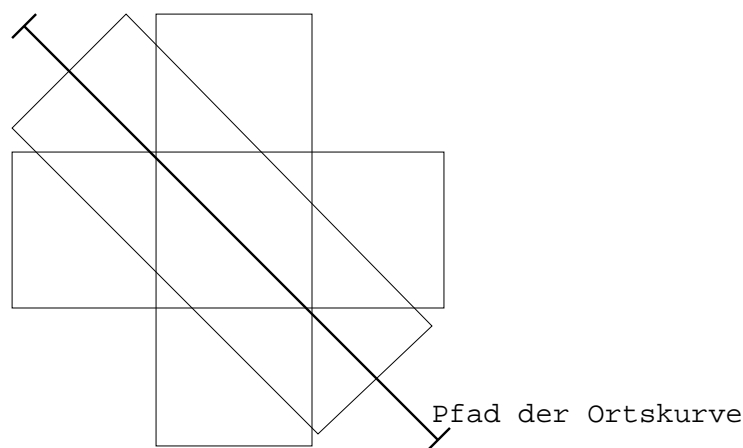


Abb. 4.15: DMS: 3 Schichten; Lage des Auswertungspfades

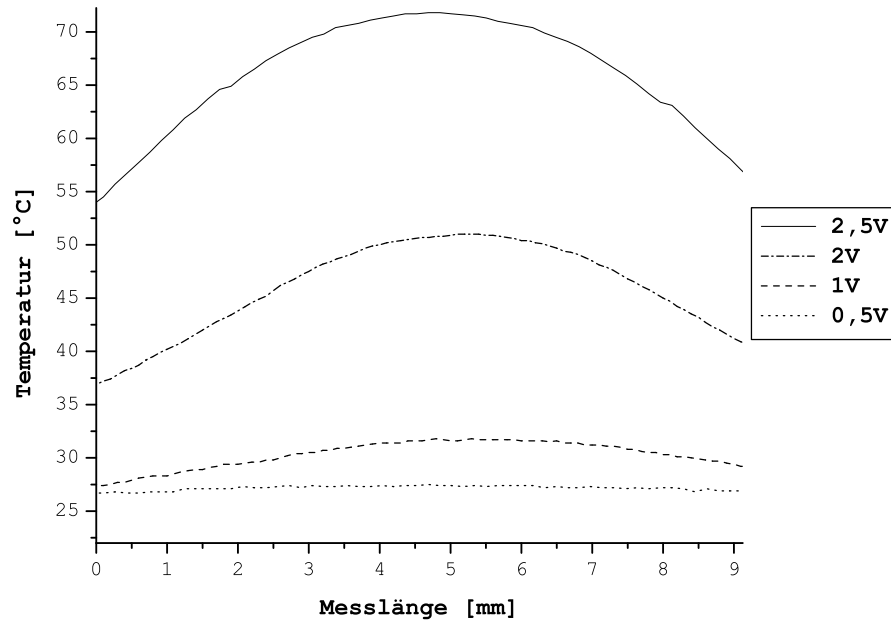


Abb. 4.16: DMS: 3 Schichten; Bauteil: Epoxidharz; Temperaturortskurve

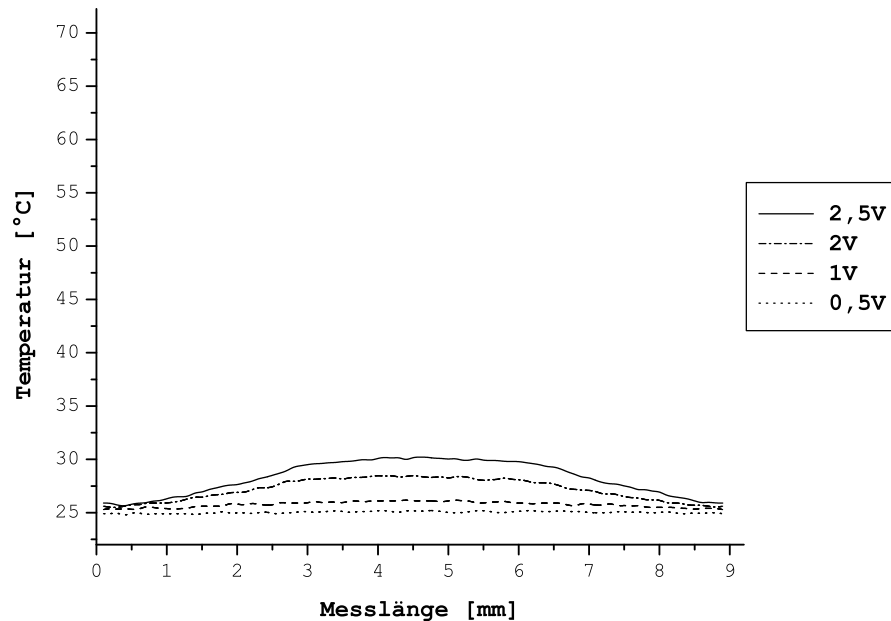


Abb. 4.17: DMS: 3 Schichten; Bauteil: Stahl; Temperaturortskurve

Die Temperaturverläufe entlang eines Gitters für die beiden verwendeten Materialien sind in den Abbildungen 4.16 und 4.17 dargestellt. Gut zu erkennen sind auch hier die oben erwähnten Unterschiede zwischen den Materialien. An den nahezu konstant verlaufenden Temperaturen

sind die Längsabmessungen des Messgitters bei Verwendung des Stahl-Bauteils gut zu erkennen. Im Gegensatz dazu sind beim Einsatz des Epoxidharz-Bauteils diese Konturen nicht zu erkennen.

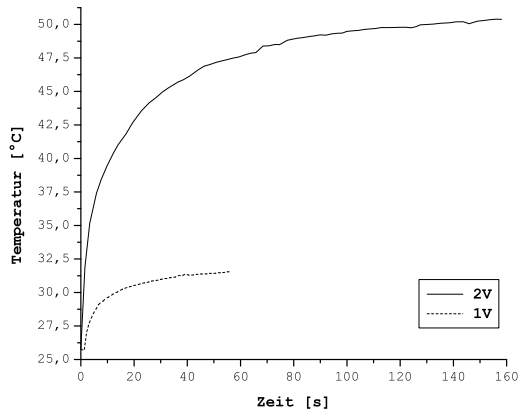


Abb. 4.18: DMS: 3 Schichten; Bauteil: Epoxidharz; Einschaltvorgang

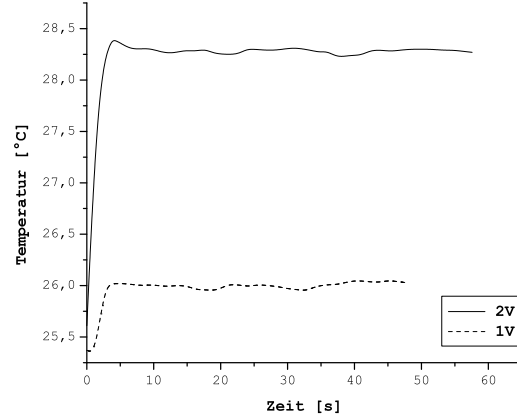


Abb. 4.19: DMS: 3 Schichten; Bauteil: Stahl; Einschaltvorgang

In den Abbildungen 4.18 und 4.19 sind die Temperaturverläufe bei Einschaltvorgängen dargestellt. Aufgenommen werden die Temperaturen an Punkten maximaler Erwärmung, was bei beiden Varianten stets der geometrische Mittelpunkt der DMS-Rosetten ist. Zu beobachten sind ein langsamer Temperaturanstieg beim Epoxidharz-Bauteil und ein schnelles Springen der Temperatur auf ihren Höchstwert beim Stahl-Bauteil. Diese Erscheinungen bestätigen und unterstützen die oben erwähnten Erscheinungen der Wärmeisolation bzw. -ableitung.

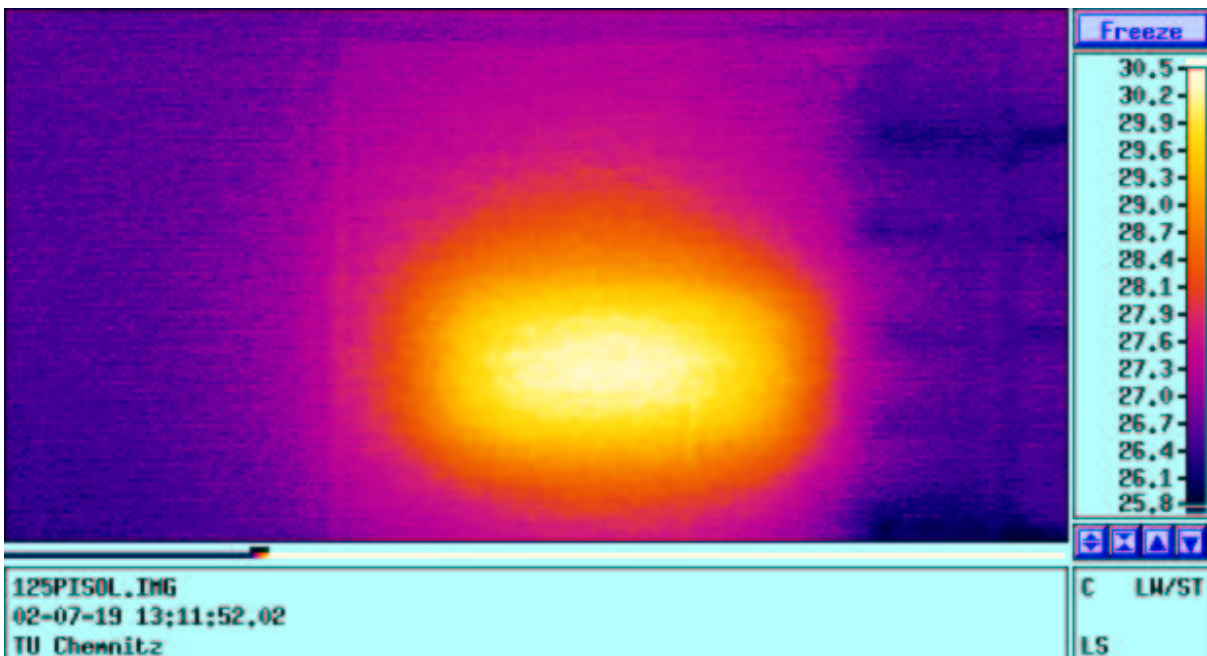


Abb. 4.20: DMS: 1 Schicht; Bauteil: Epoxidharz; Konturen des DMS

Bei den Untersuchungen am komplett angeschlossenen DMS stellt sich auch die Frage, wie die Wärmeausbreitung bei nur einer angeschlossenen Messgitterschicht des DMS ausfällt. Dazu wird nur die unterste Schicht des DMS an die Speisespannung angeschlossen. Die dabei entstehenden Thermographiebilder sind in den Abbildungen 4.20 bis 4.22 dargestellt. Besonders gut erkennbar sind in Abb. 4.20 die leicht erwärmte rechteckige Kontur des DMS und die waagerechten Anschlussdrähte auf der rechten Seite des DMS.

In den Abb. 4.21 und 4.22 sind für 2 verschiedene Speisespannungen die Thermographiebilder dargestellt. Dabei erwärmt sich der DMS bei einer Speisespannung von 1,25V auf eine Höchsttemperatur von etwa 30°C. Bei einer angelegten Speisespannung von 2,5V stellt sich eine Höchsttemperatur von etwa 40°C ein.

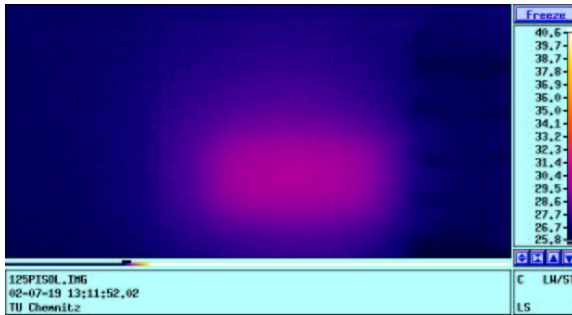


Abb. 4.21: DMS: Ebene 1; Bauteil: Epoxidharz; Speisespannung: 1,25V

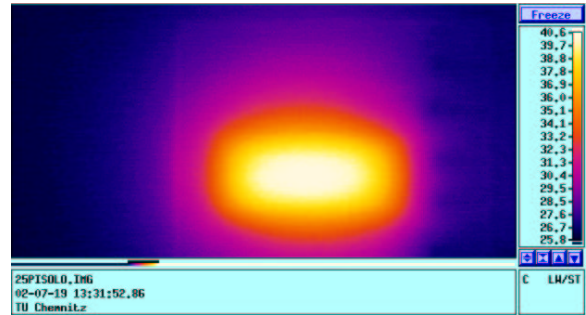


Abb. 4.22: DMS: Ebene 1; Bauteil: Epoxidharz; Speisespannung: 2,50V

Kapitel 5

Schlussbemerkungen

Die in dieser Arbeit beschriebenen experimentellen und numerischen Untersuchungen zur Dehnungsübertragung in DMS-Rosetten enthalten exemplarische und vereinfachende Annahmen. Dabei ist der Abgleich zwischen experimentellen und numerischen Untersuchungen aufgrund verschiedener Gründe nicht abschließend und exakt möglich.

- Aufgrund der getroffenen vereinfachenden Abstraktionen des DMS-Modelles wird nur ein Teil des realen DMS abgebildet.
- Die fehlende Modellierung der realen Leiterbahnen ermöglicht keine direkte Auswertung der Dehnungszustände in den einzelnen Leitern des DMS.
- Die bei den experimentellen Untersuchungen erhaltenen integralen Werte der Dehnung in einer Messgitterschicht sind nicht direkt vergleichbar mit den punktwise erhaltenen Dehnungswerten der numerischen Simulationen.

Noch zu untersuchen und zu beantworten bleiben die Fragen der Erweiterung des DMS über die in dieser Arbeit beschriebenen Weise hinaus. Eine direkte oder indirekte Modellierung der Umlenkstellen führt das Modell ein großes Stück an die Wirklichkeit heran. Ob dies durch die Beibehaltung des orthotropen Materialbeschreibungsweise möglich ist, oder durch eine direkte Modellierung der Leiterbahnen, ist eine in Zukunft zu beantwortende Frage.

Die thermographischen Untersuchungen geben Aufschluss über die Wärmequellen und die Ausbreitung der Wärme. Interessant ist weiterhin die numerische Simulation des thermischen Verhaltens und die Auswirkungen der Wärmeentwicklung auf das Dauerverhalten des DMS. Darüber hinaus ist eine Untersuchung der Auswirkungen der Wärmeentwicklung auf Messergebnisse von Interesse.

Tabellenverzeichnis

2.1	Grundsaltungen von DMS	6
3.1	Übersicht der verwendeten isotropen Materialparameter	20
3.2	Übersicht der verwendeten orthotropen Materialparameter	20
3.3	Dicken und Materialien der Schichten	21
3.4	Modellparameter	23
4.1	Technische Daten	28
4.2	Zugversuche; max. Dehnungen	30
4.3	Technische Daten	32
4.4	Wärmeleitkoeffizienten	32

Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufbau eines Folien-DMS	3
2.2	Widerstandsparameter eines metallischen Leiters	4
2.3	Grundprinzip der WHEATSTONEschen Brückenschaltung	6
2.4	Bauformen von DMS-Rosetten	7
2.5	weitere Bauformen von DMS-Rosetten	8
3.1	Schichten des DMS	12
3.2	Messgitterschicht x-Richtung (li) und Zusammenbau (re)	13
3.3	Elemente zur Darstellung von verschieden gerichteten Messgitterschichten	14
3.4	Kombinationsmöglichkeiten von Elementen	14
3.5	Koordinatentransformation	17
3.6	Pfade im Modell zur Dehnungsauswertung	22
3.7	Dehnungsübertragung in Ebene 1	23
3.8	Dehnungsübertragung in Ebene 2	24
3.9	Dehnungsübertragung in Ebene 3	24
3.10	Dehnungsübertragung; Modell 1; Kantenlänge 0,69mm	25
3.11	Dehnungsübertragung; Modell 2; Kantenlänge 1,39mm	25
3.12	Dehnungsübertragung; Modell 3; Kantenlänge 2,98mm	26
4.1	Applikation der DMS-Rosetten auf dem Dehnstab	27
4.2	Darstellung der DMS-Rosette von BLH	28
4.3	Kraft-Weg-Verlauf des Zugstabes	29
4.4	Dehnungsverlauf; Zugweg 0,5mm; Lauf 1	29
4.5	Dehnungsverlauf; Zugweg 0,5mm; Lauf 2	29
4.6	Dehnungsverlauf; Zugweg 0,5mm; Lauf 3	30
4.7	Darstellung der DMS-Rosette von HBM	32
4.8	DMS: 3 Schichten; Bauteil: Epoxidharz; Speisespannung: 2,00V	33
4.9	DMS: 3 Schichten; Bauteil: Stahl; Speisespannung: 2,00V	33
4.10	DMS: 3 Schichten; Bauteil: Epoxidharz; Speisespannung: 0,50V	33
4.11	DMS: 3 Schichten; Bauteil: Epoxidharz; Speisespannung: 1,00V	33
4.12	DMS: 3 Schichten; Bauteil: Epoxidharz; Speisespannung: 2,00V	33
4.13	DMS: 3 Schichten; Bauteil: Epoxidharz; Speisespannung: 2,50V	33
4.14	DMS: 3 Schichten; Bauteil: Stahl; Speisespannung: 5,00V	34
4.15	DMS: 3 Schichten; Lage des Auswertungspfades	34
4.16	DMS: 3 Schichten; Bauteil: Epoxidharz; Temperaturortskurve	35
4.17	DMS: 3 Schichten; Bauteil: Stahl; Temperaturortskurve	35
4.18	DMS: 3 Schichten; Bauteil: Epoxidharz; Einschaltvorgang	36

4.19	DMS: 3 Schichten; Bauteil: Stahl; Einschaltvorgang	36
4.20	DMS: 1 Schicht; Bauteil: Epoxidharz; Konturen des DMS	36
4.21	DMS: Ebene 1; Bauteil: Epoxidharz; Speisespannung: 1,25V	37
4.22	DMS: Ebene 1; Bauteil: Epoxidharz; Speisespannung: 2,50V	37

Literaturverzeichnis

- [Stock 00] Stockmann, Martin: *Mikromechanische Analyse der Wirkungsmechanismen elektrischer Dehnungsmessstreifen*. Chemnitz, Technische Universität Chemnitz, Institut für Mechanik, Habilitationsschrift, Februar 2000. - 161 S.
- [Dubb 01] Beitz, Heinrich: *Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau*. 20. Aufl. Berlin: Springer Verlag, 2001. - 1000 S. - ISBN 3-540-67777-1
- [Muell 99] Müller, Günter; Groth, Clemens: *FEM für Praktiker*. Renningen: expert-Verlag, 1999. - 847 S. - ISBN 3-8169-1857-3
- [Zienk 75] Zienkiewicz, Olgierd C.: *Methode der finiten Elemente.*, 2. Auflage, Leipzig: VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1987. - 743S. - ISBN 3-343-00361-1
- [Naum 01] Naumann, Jochen: *Experimentelle Mechanik*. Chemnitz, Technische Universität Chemnitz, Institut für Mechanik, Vorlesung 2001.
- [Perr 62] Perry, C. C.; Lissner, H. R.: *The strain gage primer*. Second Edition, New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1962. - 331 S.
- [Wind 92] Window, L. A.: *Strain Gauge Technology*. Second Edition, London: Elsevier Applied Science, 1992. - 358 S.- ISBN 1-85166-864-0
- [Chou 93] Chou, Tsu-Wei: *Structure and properties of composites.*, In: Materials science and technology, Band 13, Weinheim: VCH, 1993. - 625S. - ISBN 3-527-26826-X
- [Erma 02] Prof. Dr. Ermanni, Paolo: *Composites Technologien*. Zürich, ETH Zürich, Institut für mechanische Systeme, Vorlesung 2001/02.
- [Göld 86] Göldner, Hans; Holzweißig, Franz: *Leitfaden der technischen Mechanik*. 9. Auflage Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig, 1986. - 667 S. - ISBN 3-343-00109-0
- [Cham 84] Chamis, Christos C.; *Simplified Composite Micromechanics Equations for Hygral, Thermal and Mechanical Properties.*, SAMPE Quarterly, 1984.