

mtb messtechnische briefe

Numerische Simulation von Dehnungsmessstreifen

Klaus Hufnagel, Yu Tao,
Technische Universität
Darmstadt

Einleitung

Der Titel dieses Artikels mag zunächst manche befremden. Wozu soll ein Sensor, der in der experimentellen Spannungsanalyse und als Sensor in der Kraftmesstechnik verwendet wird, numerisch simuliert werden.

Der Grund hierfür war für uns an der TU Darmstadt zunächst ganz einfach. Als DMS-Anwender im Bereich der Mehrkomponenten-Kraftaufnehmer und hier im speziellen von Windkanalwaagen haben wir immer das Problem, dass wir DMS von Herstellern verwenden, aber keinen Einfluss auf deren Charakteristiken haben. Durch die Entwicklung von Windkanalwaagen, die bei extrem tiefen Temperaturen eingesetzt werden, waren wir aber gezwungen, uns näher mit den Charakteristiken von DMS auseinander zu setzen, um diese im geforderten Temperaturbereich von -180°C bis $+60^{\circ}\text{C}$ mit der gleichen Präzision verwenden zu können, wie dies im Raumtemperaturbereich möglich ist. In diesem Zusammenhang kam uns nun die Idee, numerische Verfahren zu verwenden, um die Eigenschaften von DMS zu ermitteln und dann durch gezielte Modifikationen von Material- und Geometrieigenschaften die DMS so zu verändern, dass diese unseren An-

sprüchen genügen. Es ist quasi ein Werkzeug zu schaffen, mit dem man die Einflussgrößen auf die DMS-Eigenschaften bestimmen kann, ohne diese durch langwierige Versuchsreihen herauszufinden. Ein sehr hoch gestecktes Ziel, wie wir im Laufe der Arbeiten erkennen mussten.

Zunächst wurde an unserem Fachbereich eine Diplomarbeit durchgeführt, die die Möglichkeit der Ermittlung des Widerstandes und der Empfindlichkeit eines DMS unter Verwendung eines Finit-Element-Programms zum Ziel hatte.

Dazu wurde eine DMS-Messstelle modelliert und die Geometrie des unverformten und des verformten DMS berechnet. Eine Möglichkeit der direkten Berechnung der daraus resultierenden Widerstandsänderung gab es nicht und so halfen wir uns mit der Nutzung der Analogie zwischen Wärmeleitung und elektrischer Leitung, um die Änderung des elektrischen Widerstands des DMS zu berechnen. Module zur Berechnung der Wärmeleitung mit Hilfe eines FE-Verfahrens waren bereits in unserem Programmpaket implementiert. Die aus dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse für die Berechnung des Widerstandes,

Numerische Simulation von Dehnungsmessstreifen
 Klaus Hufnagel, Yu Tao, Technische Universität Darmstadt

bzw. der Widerstandsänderung auf Grund der Verformung und damit der Empfindlichkeit eines DMS, bestätigten uns in der Realisierbarkeit unserer Idee. Die weitere Entwicklung des Verfahrens scheiterte nun an der entsprechenden Finanzierung und wurde deshalb auf Eis gelegt.

Vor vier Jahren nun kam es zum Kontakt mit der Firma HBM, die sich unter anderem für unsere Arbeiten auf dem Gebiet der Windkanalwaagen interessierte, weil es uns gelungen war, Kraftaufnehmer zu bauen, die über den gesamten Temperaturbereich von -180°C bis $+60^{\circ}\text{C}$ eine sehr gute Stabilität des Nullpunktes und der Empfindlichkeit besitzen. Dabei haben wir auch unsere Idee der numerischen Simulation von DMS wieder aufleben lassen und HBM zeigte sich so interessiert daran, dass für drei Jahre ein Doktorand an unserem Fachbereich finanziert werden konnte. Dieser Doktorand war Yu Tao, dessen Aufgabe darin bestand, die numerische Simulation einer DMS-Messstelle so zu entwickeln, dass damit seine Charakteristiken berechnet werden können.

Ermittelt werden sollten der Widerstand, der k-Faktor und die Querempfindlichkeit. Darüber hinaus sollte dann der Einfluss der Materialkenngrößen der verschiedenen Schichten und der Geometrie des Gitters einer DMS-Messstelle auf die Charakteristiken durch eine Parameterstudie ermittelt werden. Anfangs waren die Ziele noch höher gesteckt, denn das thermische Verhalten der Messstelle sowie das Kriechverhalten sollte ebenfalls berechnet werden. Diese Ziele konnten aber nicht mit der erforderlichen Genauigkeit realisiert werden.

Verfahren und Modellierung

Basis für die numerische Simulation bildete das Finit-Element-Programm ALGOR®, welches neben der Berechnung des Verformungszustandes auch ein Modul zur Berechnung der örtlichen Leitfähigkeit in einem Körper enthält. Dadurch wird der früher beschrittene Umweg über die Wärmeleitung unnötig. Zunächst wird vom Modell die Geometrie des verformten Zustandes bestimmt. Mit dem Modell wird dann im unverformten und im verformten Zustand eine Leitfähigkeitsberechnung durchgeführt. Für den verformten Zustand muss allerdings in einem Zwischenschritt noch der Einfluss der Volumenänderung auf den spezifischen elektrischen Widerstand ermittelt werden, der in der Leitfähigkeitsberechnung keine Berücksichtigung findet. Daraus erhält man die Widerstände für die beiden Zustände und aus der Differenz die Empfindlichkeit. Als Randbedingung für diese Berechnung wird an den Enden des Gitters eine Potentialdifferenz von 5V vorgegeben.

Zur Ermittlung des k-Faktors wird im Grundkörper eine Verformung von $1000\ \mu\text{m}/\text{m}$ mit homogener Verteilung vorgegeben. Dadurch ist die globale Randbedingung, dass sich das Gittermaterial rein elastisch verformt, erfüllt. Die Schwierigkeit dabei ist, die Randbedingungen so zu wählen, dass das Spannungsfeld unter dem DMS wirklich absolut homogen und eindimensional ist. Wir haben dies dadurch gelöst, dass der Probenkörper zur experimentellen Ermittlung des k-Faktors mit modelliert wurde (Abb. 1).

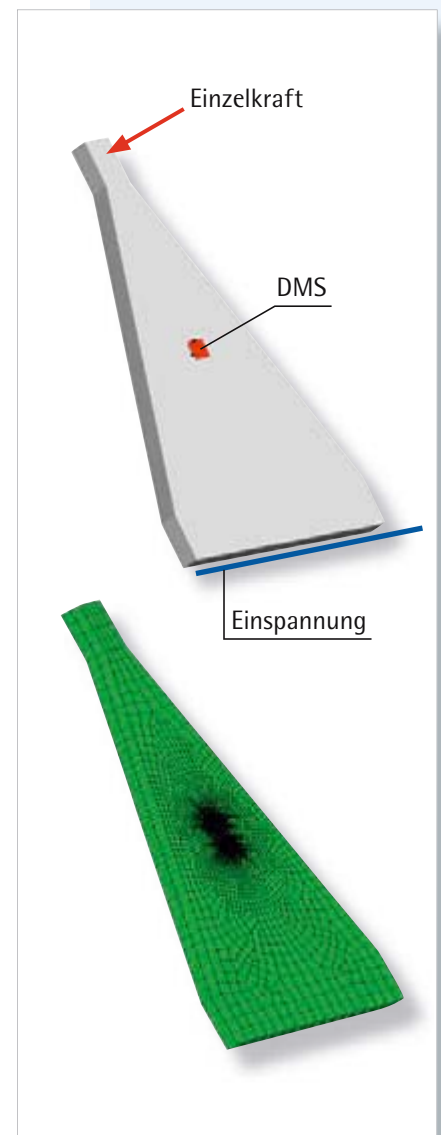


Abb. 1:
 Konstantspannungsträger
 für Experiment und
 FE-Analyse

■ Einspannung ■ Dehnungsvorgabe

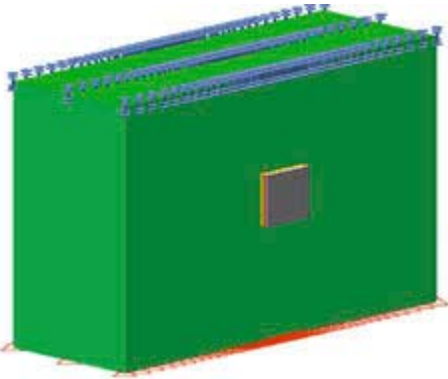


Abb. 2: FE-Modell mit Dehnungsvorgabe über Verschiebungsrandbedingungen

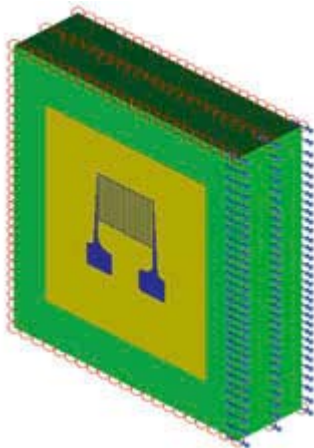


Abb. 3: Modell zur Berechnung der Querempfindlichkeit

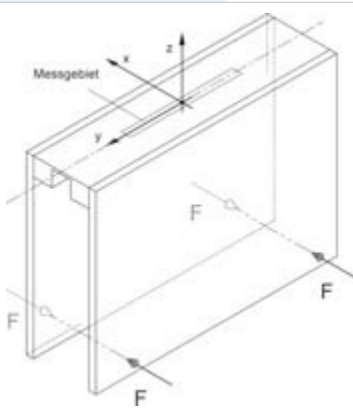


Abb. 4: Apparatur zur experimentellen Bestimmung der Querempfindlichkeit von DMS

Bei der Belastung an der Spitze des Probenkörpers durch eine Kraft entsteht im Bereich der DMS-Applikation ohne DMS auch numerisch ein absolut homogenes eindimensionales Spannungsfeld, bzw. das gewünschte zweidimensionale Dehnungsfeld. Nach der virtuellen Applikation des DMS und seiner verschiedenen Schichten ist das Feld natürlich nicht mehr ganz so homogen, da der DMS selber eine versteifende Wirkung hat. Später wurde dann zur Reduktion des Rechenaufwandes zu einem kleineren Modell übergegangen (Abb. 2). Das Dehnungsfeld im Grundkörper wird dabei durch Vorgabe von Verschiebungsrandbedingungen erzeugt.

Bei der Berechnung der Querempfindlichkeit musste ähnlich wie in dem dafür benutzten Experiment im Grundkörper ein Deformationszustand erzeugt werden, bei dem unter dem DMS nur eine Dehnungskomponente in Querrichtung auftritt. Durch Vorgabe der entsprechenden Randdehnungen, wie in **Abbildung 3** dargestellt, ist dies in der numerischen Simulation weitaus einfacher zu realisieren als in der entsprechenden Apparatur des Experimentes (Abb. 4).

Bei der Modellierung des Aufbaues der DMS-Applikation gab es die meisten Diskussionen. Zunächst wurde ein realer DMS mit 350 Ω Nennwiderstand modelliert. Der Schichtaufbau beinhaltete dabei folgende Schichten: Basismaterial, Klebstoffschicht, Trägerfolie, Gitter-Klebeschicht, DMS-Gitter, Gittereinbettung und Messstellenabdeckung (Abb. 5).

Die Vernetzung der Gesamtstruktur in Finite Elemente ist in **Abbildung 6** in verschiedenen Ausschnittsvergrößerungen dargestellt.

Für den prinzipiellen Nachweis der Methode schien der Vergleich eines realen DMS mit der Simulation zunächst sinnvoll. Für die Parameterstudie der Materialeinflussgrößen war das Modell allerdings viel zu kompliziert und es musste eine drastische Reduktion der Anzahl der finiten Elemente erfolgen, um die Rechenzeiten in brauchbaren Grenzen zu halten. Für diese Berechnungen wurde das Modell auf einen DMS mit zwei Gitterdrähten entsprechend der **Abbildung 7** reduziert.

Numerische Simulation von Dehnungsmessstreifen
Klaus Hufnagel, Yu Tao, Technische Universität Darmstadt

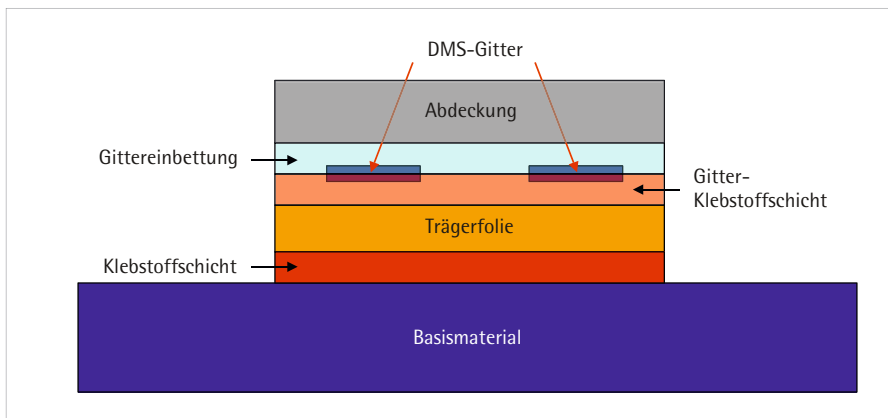


Abb. 5: Schichtenaufbau für die FE-Simulation (Ausschnitt)

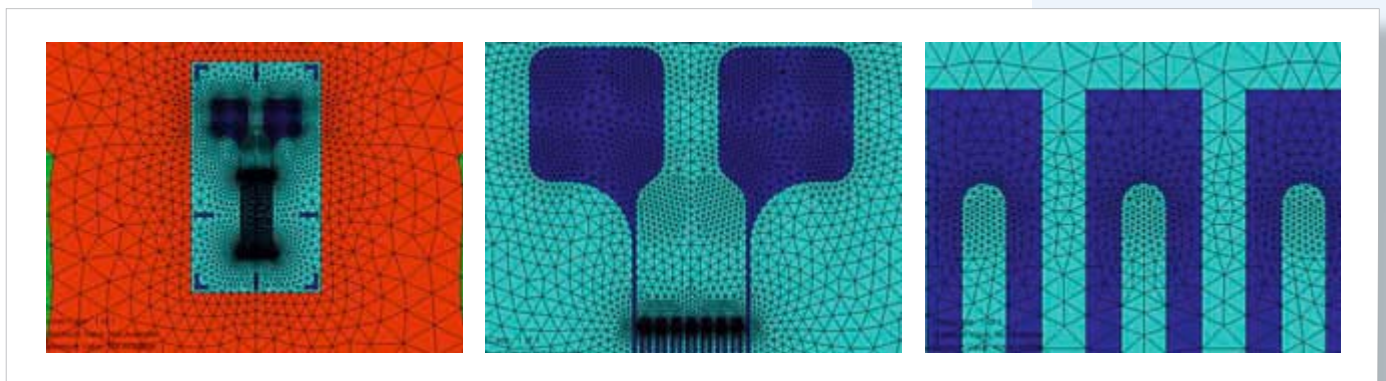


Abb. 6: FE-Netz in unterschiedlicher Ausschnittsvergrößerung

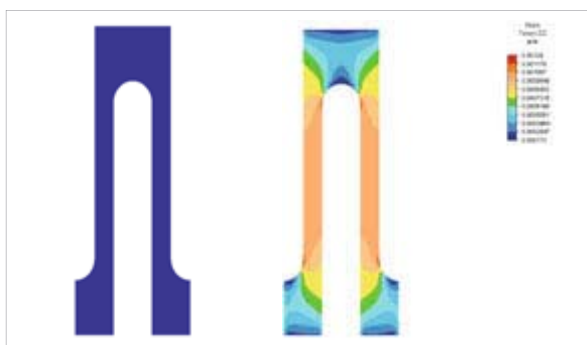


Abb. 7: Vereinfachtes DMS-Gitter für die Parameterstudie, Geometrie und berechnete Längsdehnung ϵ_z

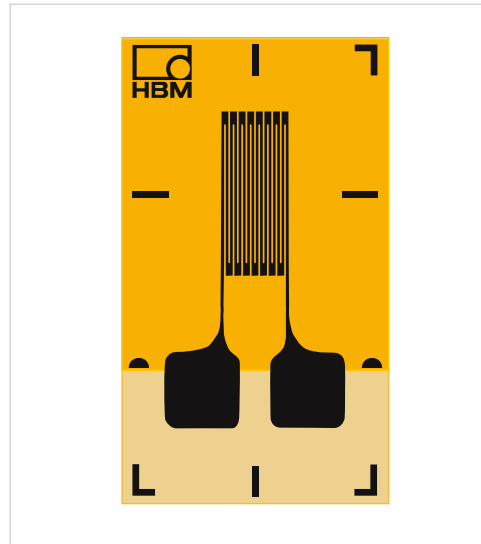


Abb. 8:
 Sonder-DMS zur
 Validierung der Finiten-
 Element-Berechnung

Frühzeitig stellte sich bei den Berechnungen heraus, dass die genaue Kenntnis der Geometrie der Messstelle und der Materialeigenschaften der verschiedenen benutzten Werkstoffe der limitierende Faktor für die Vergleichbarkeit zwischen der Simulation und den experimentellen Ergebnissen ist. Um das Verfahren dennoch hinreichend zu validieren wurde ein spezieller DMS (Abb. 8) von HBM produziert, dessen Geometrie genauestens vermessen wurde. Für diesen DMS wurden Widerstand, k-Faktor und Querempfindlichkeit berechnet und erst danach wurden die Standardversuche zur experimentellen Ermittlung dieser Kennwerte durchgeführt. Es fand also eine echte Vorhersage der Daten statt.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der FE-Simulation sowie ein Vergleich zu den experimentell bestimmten Werten sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

	Minimal gemessene Werte	Maximal gemessene Werte	Mittlerer gemessener Wert	Messunsicherheit σ_{n-1}	FE-Simulation Ergebnisse	Relative Abweichung zw. Messung und Simulation
Messgitterdicke [μm]	4,95	5,13	5,047	0,036	5,047	-
Widerstand [Ω]	144,219	144,9875	144,65	0,28	146,45	1,24%
k-Faktor [-]	2,041	2,055	2,0502	0,0061	2,042	0,4%
Querempfindlichkeit [-]	-	-	0,06%	-	0,15%	-

Tabelle:
 Vergleich der gemessenen Werte mit den Werten der FE-Berechnung

Dem Vergleich ist zu entnehmen, dass die Vorhersage für den Widerstand und die Empfindlichkeit als sehr gut bezeichnet werden kann. Die Querempfindlichkeit wird andererseits relativ ungenau vorhergesagt. Ursache dafür ist die Tatsache, dass relativ kleine Unterschiede in der Bridgeman Konstante des Gittermaterials große Änderungen in der Querempfindlichkeit hervorrufen. Zur Erinnerung, die Bridgeman Konstante gibt an, in welchem Verhältnis sich der spezifische elektrische Widerstand zu einer Volumenänderung des Gittermaterials verhält.

Numerische Simulation von Dehnungsmessstreifen
 Klaus Hufnagel, Yu Tao, Technische Universität Darmstadt

Durch frühere theoretische Betrachtungen, unter anderem von Rohrbach und Czaika [1], ist bekannt, dass die Übertragung der Dehnung vom Grundmaterial bis in das Gitter im Wesentlichen in den Umkehrschlaufen vollzogen wird. Jüngere experimentelle Untersuchungen von Stockmann [2], durchgeführt mit dem Verfahren der Moiréinterferometrie an Original-DMS, gestatten eine genaue messtechnische Erfassung der zweidimensionalen Verschiebungsfelder an der Oberfläche von DMS-Messgittern. Die Berechnung mittels des Finit-Element-Modells stellt nun quasi eine weitere Verifikation dieses Sachverhaltes dar und kann zunächst durch das folgende Bild belegt werden. In der **Abbildung 9** ist die Differenz der Längsdehnung an der Gitteroberfläche zur Längsdehnung im Grundträger dargestellt. Dort wo die Dehnung im Gitter gleich der Dehnung im Grundmaterial ist sind keine farblichen Unterschiede erkennbar. Es wird sehr deutlich, dass in den Umkehrstellen und in einem kleinen Teil des Gitters die Dehnungseinleitung in das Messgitter stattfindet, da nur dort farbliche Unterschiede zu erkennen sind. Dies bedeutet aber auch gleichzeitig, dass hier Einfluss auf DMS-spezifische Größen genommen werden kann.

Durch Darstellung der Linien konstanter Verschiebung (Isotheten) können die Ergebnisse der numerischen Simulation direkt mit den experimentellen Ergebnissen aus den moiréinterferometrischen Messungen verglichen werden. **Abbildung 10** zeigt die Isothetenfelder für die Längsrichtung aus der Untersuchung von Stockmann [2] und aus der FE-Berechnung von Tao [3]. Aus der experimentellen Untersuchung ist zu erkennen, dass wesentliche Krümmungen in den Linien nur im Bereich der Umkehrstellen vorhanden sind, während im Gitter die Linien nahezu parallel verlaufen. In der FE-Simulation ist dieses Verhalten noch viel ausgeprägter, da hier von einem ausgesprochen symmetrischen Zustand ausgegangen werden kann.

Vergleichbar gute Übereinstimmungen zeigen auch die Bilder für einen DMS unter Querdehnung (**Abb. 11**).

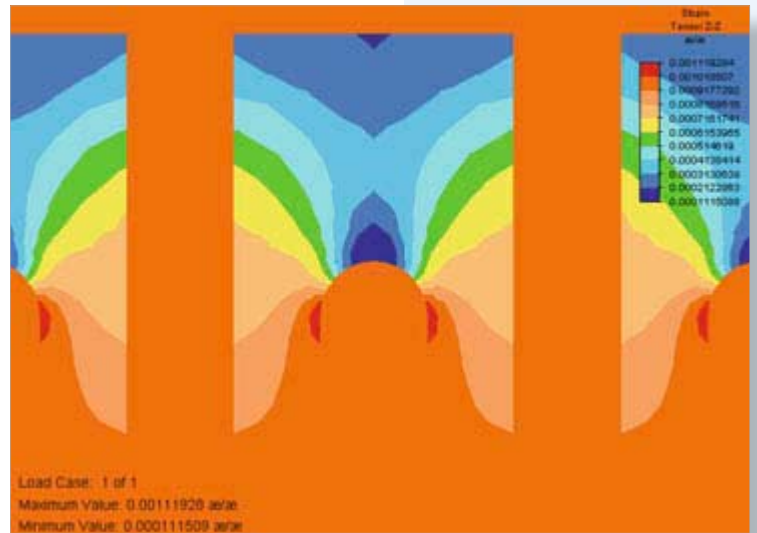


Abb. 9: Differenz der Längsdehnung (Gitteroberfläche, Grundkörper)



Abb. 10: Isotheten-Felder für Umlenkstellen und Stege unter Längsdehnung aus dem Experiment (Stockmann [2]) und aus der FE-Berechnung (Tao [3])

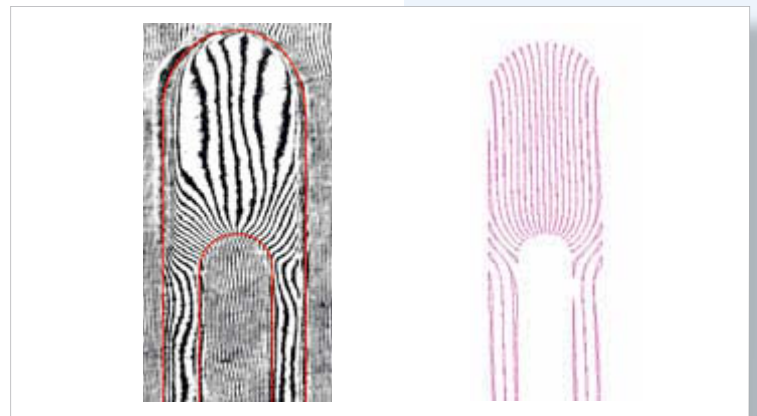


Abb. 11: Isotheten-Felder für Umlenkstellen und Stege unter Querdehnung aus dem Experiment (Stockmann [2]) und aus der FE-Berechnung (Tao [3])

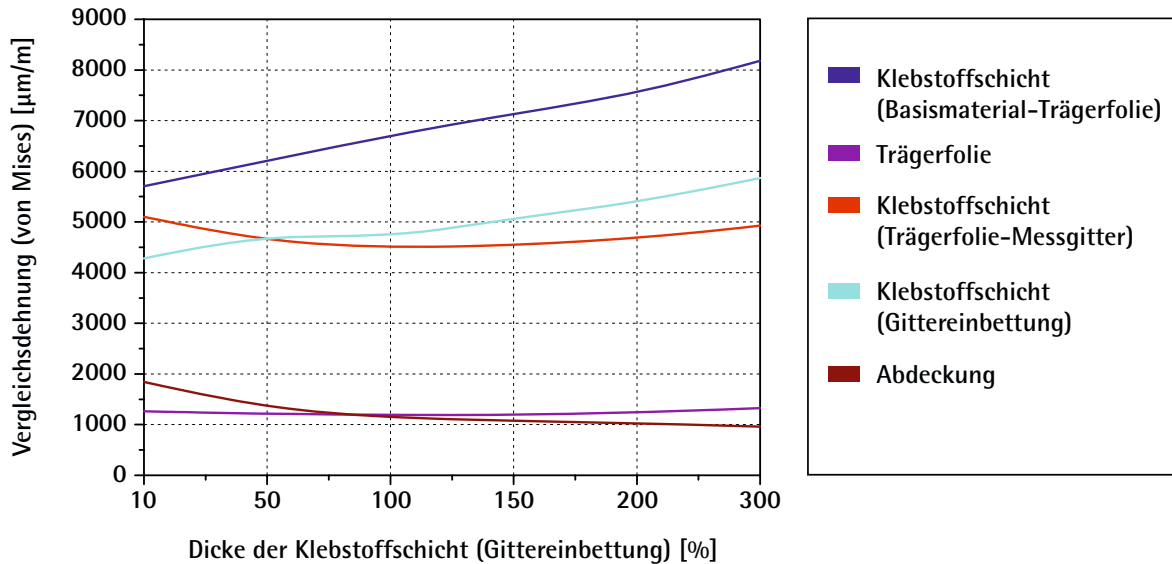


Abb. 12: Einfluss der Dicke der Gittereinbettung auf die maximal auftretende Vergleichsdehnung (von Mises) im Schichtaufbau (100% Dicke entspr. 25 µm, Dehnung im Basismaterial 1000 µm/m)

Diese Beispiele verdeutlichen, dass Ergebnisse bekannter experimenteller Untersuchungen zum Deformationsverhalten von DMS durch eine numerische Simulation gut bestätigt werden können. Ein wesentlicher Vorteil der Finit-Element-Simulation zur Untersuchung und Entwicklung von DMS ist, dass nicht wie im Experiment nur die oberste Schicht des Verbundes untersucht werden kann, sondern die Deformationszustände in jeder beliebigen Schicht sichtbar gemacht werden können. Dies ermöglicht die bereits oben erwähnte Parameterstudie.

Für ein vorgegebenes Modell (vgl. Abb. 6) wurden die Eigenschaften des Messgitters konstant gehalten und die Schichtdicken bzw. der E-Modul der anderen Schichtmaterialien variiert. Aus diesen Studien resultiert eine Fülle von Ergebnissen, die in [3] dargestellt sind.

Beispielhaft sei hier in **Abbildung 12** der Einfluss der Dicke der Gittereinbettung auf die maximal auftretende Vergleichsdehnung in den verschiedenen Schichten angegeben.

Literatur

- [1] Rohrbach, C. ; Czaika, N.: Deutung des Mechanismus des Dehnungsmessstreifens und seiner wichtigsten Eigenschaften an Hand eines Modells. Materialprüfung, Bd.1, Nr.4, S. 121-156; 1959.
- [2] Stockmann, M.: Mikromechanische Analyse der Wirkungsmechanismen elektrischer Dehnungsmessstreifen. Habilitationsschrift, Technische Universität Chemnitz, 2000, <http://archiv.tu-chemnitz.de/pub/2000/0049>.
- [3] Tao, Y.: Mechanical Investigation and Optimization of Foil Strain Gauges by FEM. Dissertationsschrift, Technische Universität Darmstadt, 2005.