

# Entwicklung und Erprobung eines flexiblen Messverfahrens mithilfe FEM-gestützter Positionierung von Dehnungsmessstreifen

Sebastian Koch <sup>1)</sup>, Cornelius Irmischer <sup>1)</sup>, Dr.-Ing. Christian Daniel <sup>1)</sup>, Jun.-Prof. Dr.-Ing. Elmar Woschke <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Institut für Mechanik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Deutschland, sebastian.koch@ovgu.de, 0391/6752409

## Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird eine Vorgehensweise präsentiert, die eine Optimierung der Positionierung von Dehnungsmessstreifen (DMS) mit Hilfe von FE-Simulationen erlaubt, um die in das System eingeleiteten Lasten bestmöglich messen zu können. Als Anwendungsbeispiel wird die Hinterachse eines Smart MC450 verwendet, welcher im Rahmen des Forschungsprojekts CoMo auf elektrische Antriebe umgerüstet wurde. Das verwendete Modell der angepassten Hinterachse dieses Forschungsfahrzeugs wird numerisch mit verschiedenen realitätsnahen, linear unabhängigen Lasten beaufschlagt. Anschließend werden mögliche Punkte ausgewählt, an denen DMS appliziert werden können. Dabei wird die Einbausituation im Fahrzeug berücksichtigt, um in späteren Arbeiten die Kräfte während der Fahrt ermitteln zu können. Die resultierenden Dehnungen auf Grund der eingeleiteten Lasten werden an den ausgewählten Punkten numerisch ausgewertet und für die Optimierung der Winkel und Positionen verwendet. Dabei ist es nicht zielführend, ausschließlich die Positionen mit der maximalen Dehnung zu suchen, sondern dafür zu sorgen, dass die gemessenen Dehnungen bei verschiedenen Lasten linear unabhängig sind. Unter Berücksichtigung der im Experiment auftretenden systematischen und zufälligen Fehler wird die beste Konfiguration ermittelt und auf einen eigens entwickelten Achsprüfstand appliziert. An diesem Prüfstand wird zum einen gezeigt, dass das Übertragungsverhalten numerisch vorausgesagt werden kann und zum anderen, dass die Lastkomponenten einer beliebigen Last ermittelt werden können. Das vorgestellte Konzept lässt sich auf andere Strukturen übertragen, außerdem sollen in weiterführenden Arbeiten die über die Räder in das Fahrwerk eingeleiteten Lasten bestimmt und mittels eines konventionellen Messrads validiert werden.

Schlüsselwörter: Messtechnik, Bauteillasten, Dehnungsmessstreifen, Finite-Elemente-Methode, Positionsoptimierung

## 1. Einleitung

Die messtechnische Bestimmung von Bauteillasten und -beanspruchungen ist ein wichtiger Aspekt des Maschinenbaus. Diese Größen werden sowohl für die Auslegung technischer Systeme als auch für die Validierung von Simulationen verwendet, weshalb eine geeignete Bestimmung auch heute noch Gegenstand der Forschung ist. Eine verbreitete Variante, die in ein Bauteil eingeleiteten Kräfte und Momente zu bestimmen, ist die Verwendung von DMS. Dazu werden diese auf die Oberfläche des Messobjekts appliziert, wodurch den DMS die auftretenden Dehnungen des Messobjekts aufgeprägt werden. Diese Dehnungen bewirken eine Änderung des elektrischen Widerstands, der leicht messbar ist, wodurch mit hoher Präzision auf die Dehnungen geschlossen werden kann. Somit messen DMS die Dehnung, die von den zu ermittelnden Messgrößen hervorgerufen wurden und erlauben so einen Rückschluss auf die Messgrößen selbst[1].

Im Bereich der Fahrzeugentwicklung spielen die Kräfte und Momente, die über die Reifen eingeleitet werden, eine zentrale Rolle. Diese äußeren Anregungen sind stark vom Fahrverhalten und der Fahrbahn abhängig und können mit kommerziellen Messrädern, welche DMS verwenden, ermittelt werden (CAEMAX, Kistler). Aus dem hohen Kosten dieser kommerziellen Messgeräte resultiert der Wunsch nach kostengünstigen Alternativen. Zum Beispiel zeigt die Arbeit von Späth [2] die Entwicklung eines Messrads für Traktoren, wohingegen Steinkampf [3] die Entwicklung eines Messkreuzes für die Bestimmung der Kräfte zwischen Arbeits- und Kraftmaschine beschreibt. In verschiedenen Arbeiten wurde gezeigt, dass geeignete DMS-Positionen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) ermittelt werden können [4, 5]. Dafür werden die erwarteten Dehnungen bestimmt und mit problemabhängigen Kriterien optimiert. Mit Hilfe dieser Optimierungen wird die Ergebnisqualität verbessert oder die Anzahl der benötigten Messstellen reduziert.

Als Anwendungsbeispiel wird in dieser Arbeit die Hinterachse eines Smart MC450 verwendet, welcher im Rahmen des Forschungsprojekts Competence in Mobility (CoMo) auf elektrischen Antrieb umgerüstet wurde. Die Fahrwerkslasten, die über das Rad eingeleitet werden, sollen mit DMS ermittelt werden. Anders als bei Messrädern werden diese DMS auf der Radachse appliziert. Das Übertragungsverhalten wird mit Hilfe der Finiten Elemente Methode (FEM) berechnet und ein Vergleich aller ausgewählten Positionsmöglichkeiten durchgeführt. Das so bestimmte Übertragungsverhalten muss sowohl hohe Dehnungen als auch eine gute Kondition aufweisen. Zur

Optimierung dieser zwei Kriterien wird der Pareto-Ansatz verwendet, welcher mehrere Optimierungsparameter zu einem zusammenfasst. Da diese Vorgehensweise verschiedene Lösungen erzeugt, wird eine Fehlerberücksichtigung durchgeführt, welche die im Versuch auftretenden zufälligen und systematischen Fehler einbezieht. Die Anwendbarkeit des vorgestellten Optimierungskonzepts wird an einem Achsprüfstand, welcher die Achse des geplanten Versuchsfahrzeugs verwendet, nachgewiesen. Des Weiteren wird dort die hohe Genauigkeit des Messverfahrens gezeigt.

## 2. Theoretische Grundlagen

In dieser Arbeit werden die in das Bauteil eingeleiteten Lasten mit Hilfe der inversen Matrixmethode bestimmt. Dafür werden  $n_{\text{Last}}$  linear unabhängige Lasten  $F$  auf das Bauteil aufgebracht und die zugehörigen Dehnungen  $\underline{\epsilon}$  mit  $n_{\text{DMS}}$  DMS gemessen. Die entstehende Übertragungsmatrix  $\underline{H}$  stellt einen linearen Zusammenhang zwischen Kraftvektor  $\underline{F}$  und Dehnungsvektor  $\underline{\epsilon}$  dar

$$\underline{H} \cdot \underline{F} = \underline{\epsilon}. \quad (1)$$

Durch Umstellen von Gleichung (1), kann aus den gemessenen Dehnungen auf die eingeleiteten Lasten geschlossen werden [6]

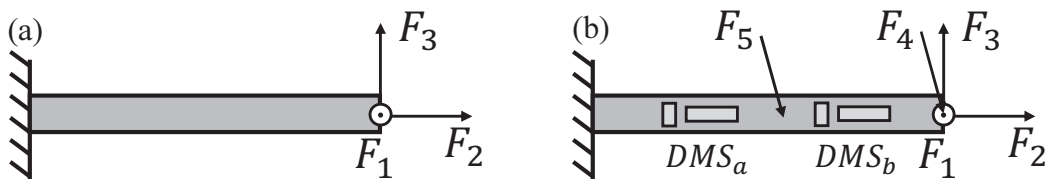
$$\underline{F} = \underline{H}^{-1} \cdot \underline{\epsilon}. \quad (2)$$

Die Anzahl der notwendigen DMS  $n_{\text{DMS}}$ , um von der Dehnung eindeutig auf die gesuchten Kräfte schließen zu können, entspricht im Allgemeinen der Anzahl der auf das Bauteil wirkenden Lasten  $n_{\text{Last}}$  abzüglich der Lasten, die notwendig sind, um eine Starrkörperbewegung zu verhindern und ergibt sich im Raum (3D) zu

$$n_{\text{DMS}} = n_{\text{Last}} - 6. \quad (3)$$

Die Verwendung zusätzlicher DMS erlaubt eine Fehlerabschätzung. Werden zu wenig DMS bzw. zu wenige linear unabhängige DMS verwendet, kommt es zur Übersprechung, was bedeutet, dass die gemessenen Dehnungen nicht eindeutig auf die eingeleiteten Kräfte zurückgeführt werden können.

Allerdings kann auch die Geometrie Einfluss darauf haben, wie viele DMS benötigt werden. Als veranschaulichendes Beispiel zeigt Bild 1(a) einen einfachen Kragbalken im Raum, welcher am Ende mit 3 linear unabhängigen Kräften  $F_1$ - $F_3$ , veränderlicher Größe, belastet wird. Jede dieser Lasten bewirkt ein anderes Dehnungsverhalten des Balkens. Wird ein DMS auf den Balken appliziert, misst er bei jedem Lastfall die auftretenden Dehnungen. Das bedeutet allerdings auch, dass eine gemessene Dehnung weder auf die Lastrichtung, noch auf die Größe zurückgeführt werden kann. Dafür werden mindestens 3 DMS benötigt, die linear unabhängige Dehnungen messen. Es ergibt sich ein Gleichungssystem nach (1). Die Übertragungsmatrix  $\underline{H}$  wird durch aufbringen von 3 definierten linear unabhängigen Lasten und Messen der zugehörigen Dehnungen ermittelt.



**Bild 1: Eindeutig eingespannter Balken mit 3 linear unabhängigen Lasten am Balkenende**

Wird eine zusätzliche Kraft  $F_4$  am Ende des Balkens aufgebracht und von den Dehnungen auf die Kräfte geschlossen, wird die zusätzliche Kraft als Linearkombination der Ausgangslasten  $F_1$ - $F_3$  ermittelt. Wird die zusätzliche Last  $F_5$  an einem anderen Punkt aufgebracht muss zwischen zwei Fällen unterschieden werden. Die Kraft  $F_5$  mit den  $DMS_a$  im Bild 1(b) zeigt den allgemeinen Fall, bei dem die zusätzliche Last zwischen Balkenende und den DMS eingeleitet wird. Die Dehnungen einer solchen Lasteinleitung würden als eine Kombination aus  $F_1$ - $F_3$  interpretiert werden, obwohl sie eine andere Ursache haben. Um die gesuchten Kräfte dennoch ermitteln zu können, wird ein zusätzlicher DMS benötigt. Mit diesem zusätzlichen DMS, kann sowohl die Größe der gesuchten Kräfte  $F_1$ - $F_3$ , als auch die Größe der zusätzlichen Kraft  $F_5$  ermittelt werden. Jede zusätzliche Last, die keine Linearkombination von anderen einleitbaren Lasten ist, erhöht die Anzahl der benötigten DMS um 1.

Werden die  $DMS_b$  verwendet, wird ersichtlich, dass diese Aussage nicht allgemein gültig ist. Die zusätzliche Kraft  $F_5$  wird im Bereich zwischen den  $DMS_b$  und der Einspannung eingeleitet, wodurch sich die Dehnungen im Bereich der DMS nicht ändern. Dies kann durch Bestimmung der Spannung und damit auch der Dehnung aus den Schnittgrößen leicht gezeigt werden. Somit ist ersichtlich, dass kein weiterer DMS benötigt wird.

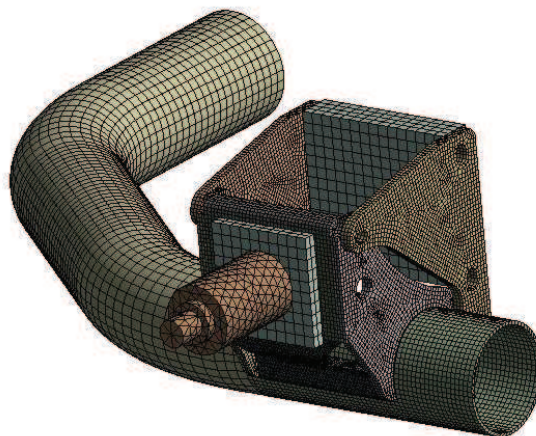
Dieser Fall kann bei der untersuchten Achse angewendet werden, wenn die DMS am Radlager appliziert werden, denn die durch den Querlenker, das Federbein oder den Dämpfer eingeleiteten Kräfte werden an verschiedenen Punkten in die Achse eingeleitet und verursachen nur dann Dehnungen im Radlager, wenn die Lasten über das Rad (Radlasten), das am Radlager befestigt ist, übertragen werden. Bild 2 zeigt die Halbachse mit Radlager.

### 3. FEM basierte Abschätzung der Positionierung

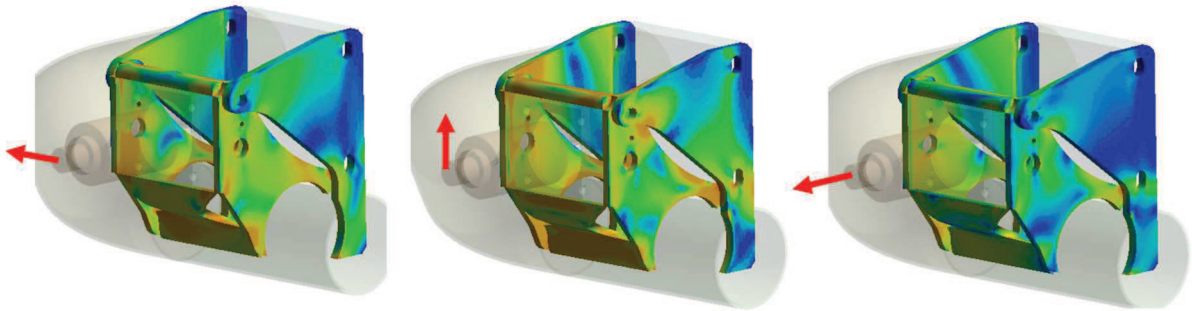
Als Untersuchungsobjekt dient die Hinterachse eines Smart MC450, wobei aus Symmetriegründen nur die Hälfte verwendet wird. Die von den DMS gemessenen Dehnungen werden mit der FEM prädictiert. Das verwendete Modell ist in Bild 2 dargestellt. Für die statische Analyse mit 14000 Freiheitsgraden werden drei linear unabhängige Lastfälle betrachtet. Die resultierenden Vergleichsdehnungen sind in Bild 3 dargestellt. Für die DMS-Positionierung werden Punkte gewählt, die am realen Bauteil gut erreichbar sind und nicht direkt an Kanten liegen, um Spannungserhöhungen zu vermeiden. Außerdem befinden sich alle ausgewählten Punkte am Radlager, wodurch die Feder und der Dämpfer, welche im realen Fahrzeug verwendet werden, keinen Einfluss auf die gemessenen Dehnungen haben (siehe Abschnitt 2). Die gewählten Knoten sind in Bild 4 gezeigt. Für die Optimierung, welche mit MATLAB durchgeführt wird, werden Dehnungen in Richtung des DMS benötigt. Um verschiedene Richtungen einfach vergleichen zu können, wird der Dehnungstensor  $\underline{\underline{\epsilon}}$  für jeden ausgewählten Punkt und jeden Lastfall ermittelt. Mit Hilfe von Gleichung (4) und dem Richtungsvektor  $t_{DMS}$  des DMS kann die Dehnung in der gewünschten Richtung  $\epsilon_{DMS}$  ermittelt werden[5]

$$\epsilon_{DMS} = t'_{DMS} \cdot \underline{\underline{\epsilon}} \cdot t_{DMS}. \quad (4)$$

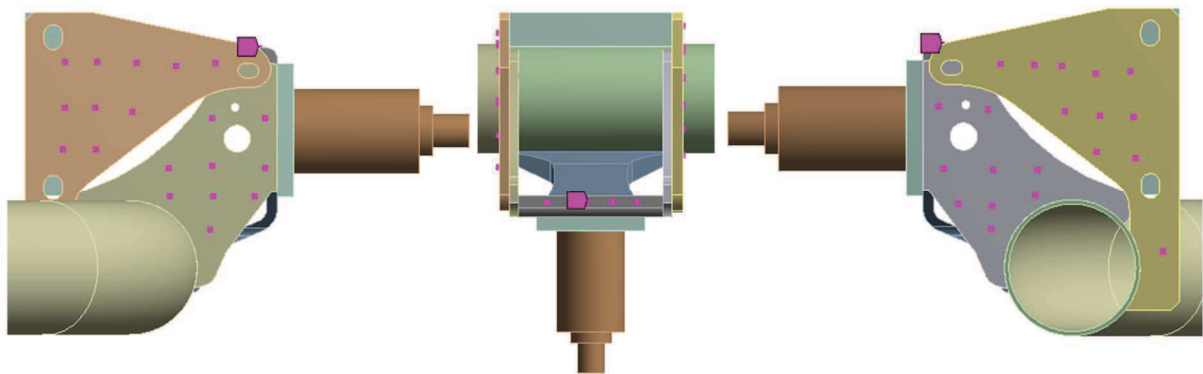
Diese Form der Voraussage der gemessenen Dehnungen lässt sich für beliebige FE-Knoten und Richtungen umsetzen. Allerdings werden bei dieser Methode die Dehnungen an exakt einem Knoten bestimmt. In der Realität wird die Dehnung über die Länge des DMS gemittelt, was bei hohen Dehnungsgradienten und großen DMS zu Fehlern führt. Um diesen Fehler zu verringern, werden kleine DMS verwendet. Des Weiteren erhöhen hohe Dehnungsgradienten, auf Grund von Fehlern bei der Positionierung, den Unterschied zwischen berechneter und experimentell ermittelter Übertragungsmatrix, wodurch sich die Aussagekraft der Positionsoptimierung verringert. Die Bestimmung der eingeleiteten Kräfte kann dennoch durchgeführt werden, indem die Übertragungsmatrix experimentell bestimmt wird.



**Bild 2: FE-Modell der halben Achse bzw. des Achsprüfstands**



**Bild 3: Resultierende Vergleichsdehnungen bei verschiedenen Lasten**



**Bild 4: Ausgewählte Knoten für mögliche DMS-Positionen**

## 4. Optimierung der DMS-Position

### 4.1 Optimierung

Zur Bestimmung der optimalen DMS-Position werden alle Kombinationen der ausgewählten DMS-Positionen und Winkel miteinander verglichen. Dazu muss gewählt werden, wie viele DMS auf dem Messobjekt positioniert werden sollen, welche Winkel zugelassen werden und an welchen Punkten eine Applikation möglich ist. Die Anzahl der verschiedenen Möglichkeiten wird im Abschnitt 4.2 gezeigt. In der vorliegenden Arbeit werden 5 DMS verwendet.

Zwei Kriterien zeichnen ein gutes Übertragungsverhalten aus. Zum einen sollen die gemessenen Dehnungen möglichst groß sein, damit die Rauscheffekte verglichen mit dem Messsignal klein sind, die Norm der Übertragungsmatrix  $\underline{H}$  soll demnach möglichst groß sein. Zum anderen sollen die gemessenen Dehnungen möglichst unabhängig voneinander sein, die Kondition der Übertragungsmatrix  $\underline{H}$  soll also möglichst klein sein.

Diese beiden Kriterien sind unabhängig voneinander und können im Allgemeinen nicht gleichzeitig erfüllt werden. Solche mehrkriteriellen Optimierungen, auch Pareto-Optimierungen, werden mittels Gewichtungsfaktoren  $c_i$  zu einer gemeinsamen Zielfunktion zusammengefasst. Die Norm und die Kondition der Übertragungsfunktion unterscheiden sich um mehrere Größenordnungen und werden deshalb mit einer beliebigen Anfangsübertragungsmatrix  $\underline{H}_0$  normiert [7]

$$f = c_{Kondition} \cdot \frac{Kondition(\underline{H})}{Kondition(\underline{H}_0)} + c_{Norm} \cdot \frac{Norm(\underline{H}_0)}{Norm(\underline{H})} \rightarrow Min, \quad (5)$$

wobei die Summe der Wichtungsfaktoren gleich 1 ist. Es ist leicht zu sehen, dass das gefundene Optimum stark von den Wichtungsfaktoren und der Anfangsübertragungsmatrix, welche zufällig gewählt wurde, abhängt. Diese Abhängigkeit wird mit Hilfe einer Fehlerberücksichtigung, welche in Abschnitt 4.3 vorgestellt wird, beseitigt.



## 4.2 Permutationen

Die Anzahl der möglichen DMS-Winkel und -Positionen, die für die Optimierung verwendet werden, darf nicht zu groß gewählt werden, um die Permutationen  $n_{\text{Permutation}}$  zu beschränken. Diese ergibt sich aus der Anzahl der verwendeten DMS  $n_{\text{DMS}}$ , der Menge der möglichen DMS-Position  $n_{\text{gew}}$  und der Anzahl der verschiedenen Winkel  $n_{\text{Winkel}}$ , welche die DMS auf dem Bauteil haben dürfen

$$n_{\text{Permutation}} = (n_{\text{Winkel}})^{n_{\text{DMS}}} \cdot \left( \frac{n_{\text{gew}}!}{(n_{\text{gew}} - n_{\text{DMS}})! \cdot n_{\text{DMS}}!} \right). \quad (6)$$

Die zulässigen Winkel haben einen entscheidenden Einfluss auf die Optimierungsdauer. Werden nur  $0^\circ$  und  $90^\circ$  als Winkel zugelassen, ist die Rechenzeit 32-fach geringer als wenn zusätzlich  $45^\circ$  und  $135^\circ$  zugelassen werden. Um die 3 linear unabhängigen Lasten erfassen zu können, müssen mindestens 3 DMS auf das Messobjekt appliziert werden. Nachfolgend werden 44 mögliche Punkte, 5 DMS und 4 Winkel ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ ) verwendet, was einer Rechenzeit für die Positionsoptimierung von ca. 18h und ca.  $1E9$  Permutationen entspricht. Die Rechenzeit der Positionsoptimierung ist damit deutlich größer als die Bestimmung der Dehnungstensoren mittels FEM, die nur wenige Minuten in Anspruch nimmt.

## 4.3 Fehlerberücksichtigung

Die Idee der Fehlerberücksichtigung beruht darauf, dass die Norm und die Kondition so gewählt werden, dass im Experiment die beste Bestimmung der eingeleiteten Lasten möglich ist. Dabei wird einbezogen, dass es im Experiment zu Messfehlern kommt. Als erstes werden die optimalen Positionen bei verschiedenen Wichtungsfaktoren und gleicher Anfangsübertragungsmatrix bestimmt.

In einem zweiten Schritt wird mit Hilfe der jeweiligen optimalen Übertragungsmatrix und gewählten Belastungen die zugehörige Dehnung mit Hilfe von Gleichung (1) bestimmt. Diese Dehnungen werden mit prozentualen Fehlern (5%) und absoluten Fehlern ( $5e-5$ ) beaufschlagt

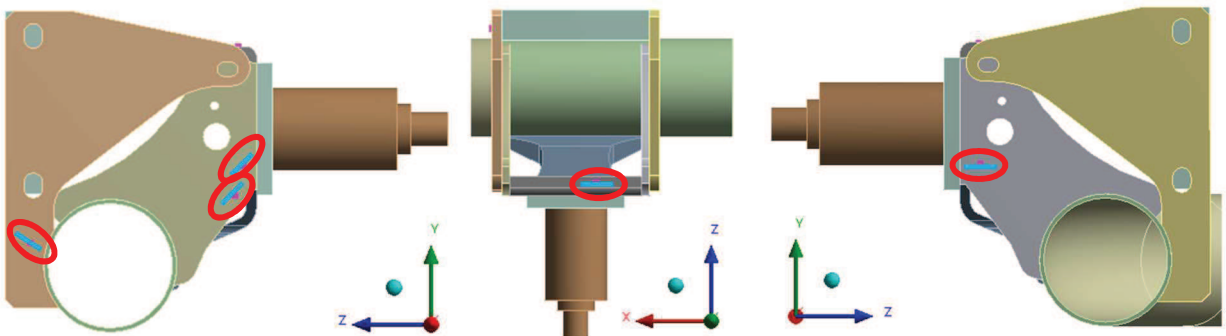
$$\varepsilon_{i,j} = \varepsilon_{i,j} \cdot (\pm f_{\text{rel}}) \pm f_{\text{abs}}. \quad (7)$$

Aus den fehlerbeaufschlagten Dehnungen werden die eingeleiteten Kräfte nach Gleichung (2) berechnet und mit den tatsächlich eingeleiteten Kräften verglichen. Der daraus resultierende Fehler soll minimiert werden. So wird diejenige Übertragungsmatrix ausgewählt, die am wenigsten sensitiv gegenüber dem angenommenen Messfehler ist.

Dabei ist zu beachten, dass die Fehler zufällig und nicht gleichgerichtet auftreten. Das bedeutet, wenn alle berechneten Dehnungen eine 5% höhere Dehnung als die berechnete erhalten, ergeben sich Fehler von 5%. Dafür werden alle Fehlerpermutationen berücksichtigt, was bedeutet, dass alle Vorzeichen von Gleichung (7) variiert werden. Die Konfiguration mit dem kleinsten Fehler ist in Bild 5 dargestellt. Diese Konfiguration wird auch am Prüfstand, welcher in Bild 6 dargestellt ist, verwendet. Der Wichtungsfaktor  $c_{\text{Kondition}}$  sollte nicht Null gesetzt werden, andernfalls werden die erwarteten Fehler sehr groß.

## 4.4 Ausgewählte Knoten

Die mit der vorgestellten Methode ausgewählten Positionen sind in Bild 5 dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass 3 der 5 DMS auf einer Fläche appliziert werden, was auf die höheren Dehnungen in diesem Bereich zurückgeführt werden kann.

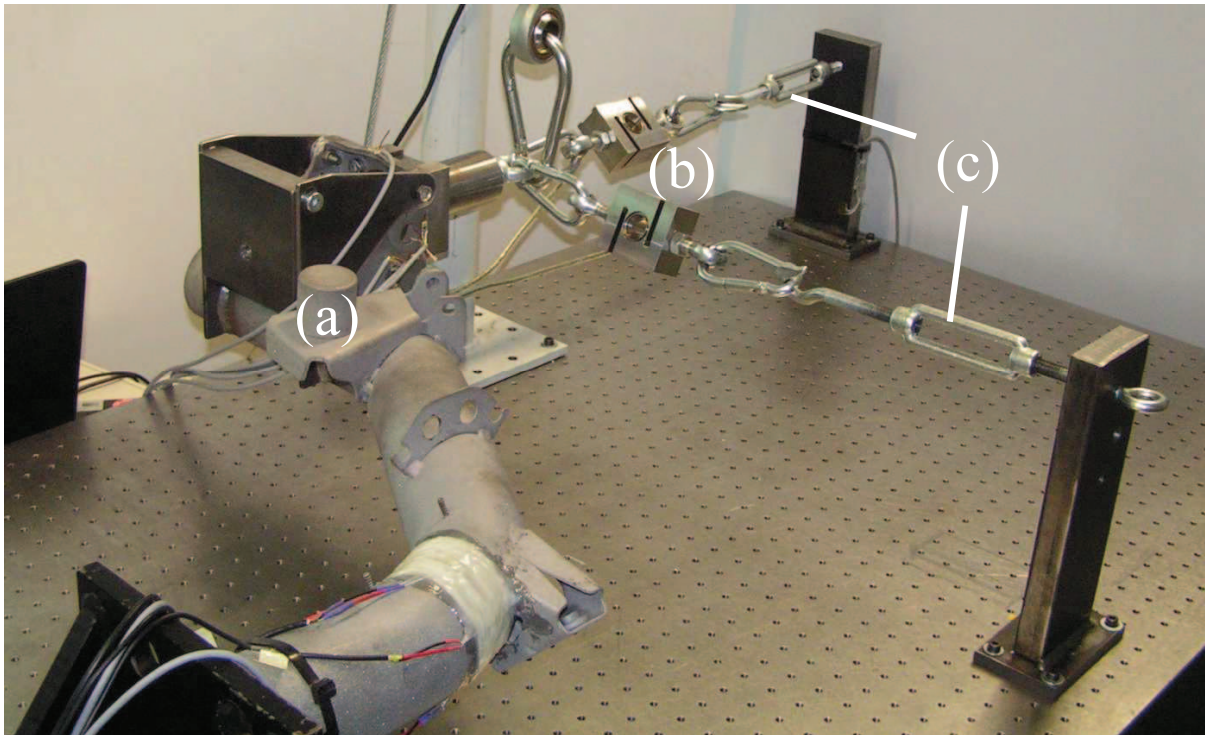


**Bild 5: Ausgewählte DMS Positionen und Winkel**

## 5. Vergleich des numerischen und experimentellen Übertragungsverhaltens

### 5.1 Versuchsaufbau

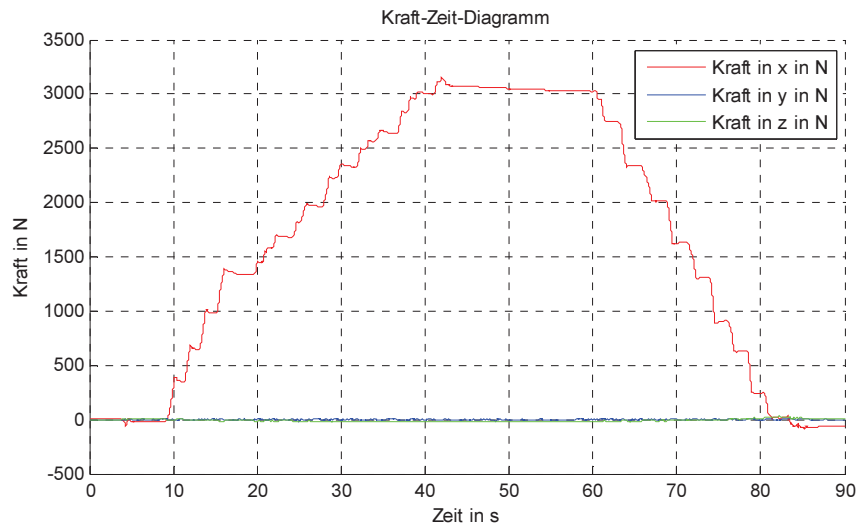
Die verwendete halbe Achse eines Smart MC450 ist in Bild 6 dargestellt. Mit Hilfe von 3 Spannschlössern (c) wird die Kraft in das Versuchsbauteil eingeleitet. Diese eingeleiteten Kräfte werden mit 3 Kraftmessdosen (b) (KAS von A.S.T. GmbH Dresden) gemessen. Die aus den eingeleiteten Kräften resultierenden Dehnungen werden mit Hilfe der DMS (a) bestimmt, welche an den vorher berechneten Positionen aus Bild 5 appliziert sind. Für die verwendeten Viertelbrücken wird die Dreileiterschaltung verwendet, welche gegenüber der Zweileiterschaltung den Einfluss der Kabeltemperatur und des Kabelwiderstandes reduziert. Ein Temperatureinfluss und ein Drift der gemessenen Dehnungen bei Langzeitmessungen lassen sich bei Viertelbrücken nicht vermeiden und erfordern häufiges Kalibrieren. Im realen Fahrzeug werden zusätzlich Federn und Dämpfer verwendet. Diese wurden im Prüfstand nicht nachgebildet, da sie im Bereich der DMS keine Dehnungen hervorrufen (siehe Abschnitt 2 - Beispiel eines eingespannten Balkens).



**Bild 6: Achsprüfstand mit DMS-Matrixbeklebung, 3 Kraftsensoren und Spannschlössern zur Lasteinleitung**

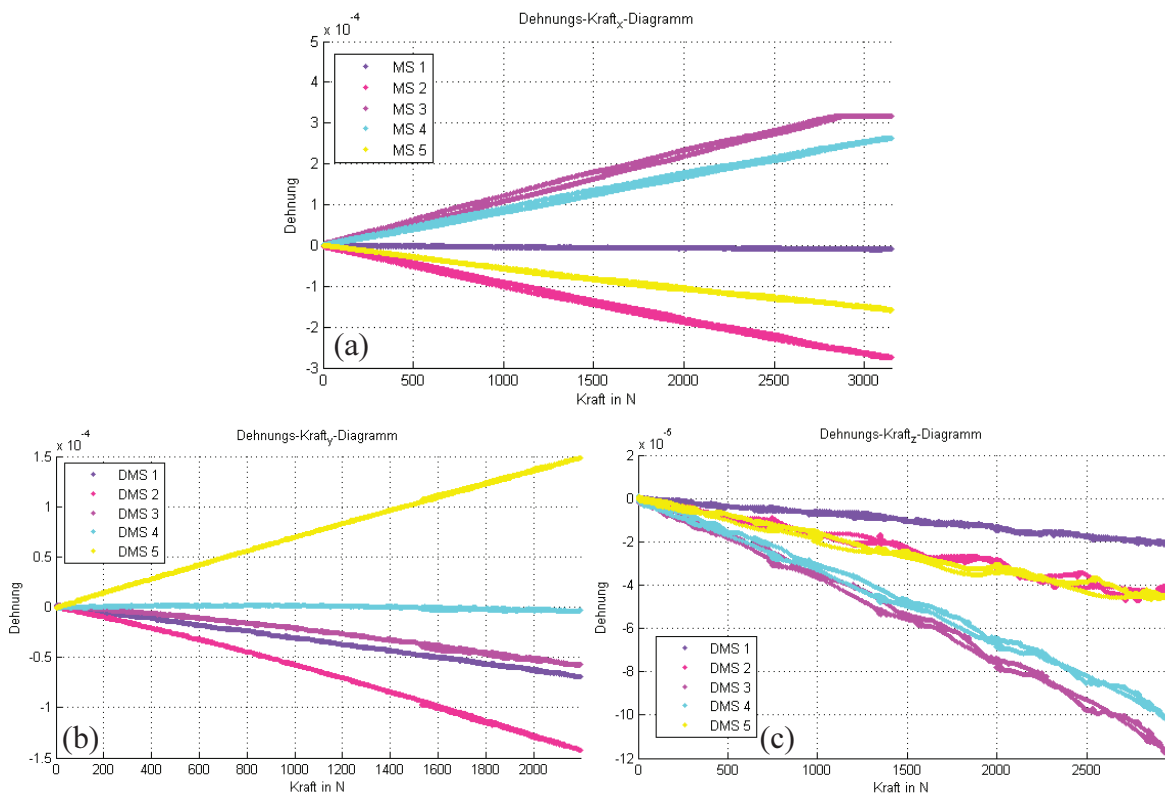
### 5.2 Vergleich der bestimmten Übertragungsverhalten

In einem ersten Schritt wird das Übertragungsverhalten ermittelt. Dazu werden die auftretenden Dehnungen bei Belastungen in einer Koordinatenrichtung bestimmt. Bild 7 zeigt die Be- und Entlastung in x-Richtung. Die anderen Koordinatenrichtungen bleiben unbelastet. Bild 8(a) zeigt den Kraft-Dehnungsverlauf von 5 DMS bei Belastung in x-Richtung. Der lineare Zusammenhang zwischen Kraft und Dehnung ist bei allen DMS gut zu erkennen. Bei DMS 3 ist oberhalb einer Belastung von 2700 N ein Plateau zu erkennen. Dieses resultiert aus dem Überschreiten des gewählten Messbereiches und sollte vermieden werden. Das Übertragungsverhalten in y und z Richtung ist in Bild 8(b) und Bild 8(c) dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Dehnungen in z-Richtung geringer sind als in x- und y-Richtung. Im Dehnungs-Kraft-Diagramm sind Abweichungen vom linearen Verhalten erkennbar. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Berechnung der Belastung in dieser Richtung fehleranfälliger ist als in den anderen beiden Richtungen.



**Bild 7: Be- und Entlastung in x-Richtung zur Bestimmung der Übertragungsmatrix**

Das sich ergebende Übertragungsverhalten wird in Tabelle 1 dem numerisch bestimmten gegenübergestellt. Es ist gut zu erkennen, dass es deutliche Unterschiede zwischen den gemessenen und vorausgesagten Dehnungen gibt. Diese Unterschiede resultieren sowohl aus einem vereinfachten numerischen Modell als auch aus den Ungenauigkeiten bei der Positionierung der DMS am Prüfstand. Ein weiterer Fehler entsteht durch die Mittelung der Dehnungen über den DMS. Während numerisch die Dehnung an einem diskreten Punkt ausgewertet wird, wird sie im Experiment über die Länge des DMS gemittelt. Besonders bei Bauteilen mit starken Dehnungsgradienten, wie es bei der vorliegenden Achse der Fall ist (siehe Bild 3), treten solche Unterschiede auf. Das Dehnungsverhalten kann grob vorausgesagt werden, allerdings muss für die Nutzung der inversen Matrixmethode die experimentell ermittelte Übertragungsfunktion genutzt werden. Die Güte der vorgestellten Optimierung der DMS-Position, ist von der Voraussagbarkeit des Dehnungsverhaltens vom untersuchten Objekt abhängig.



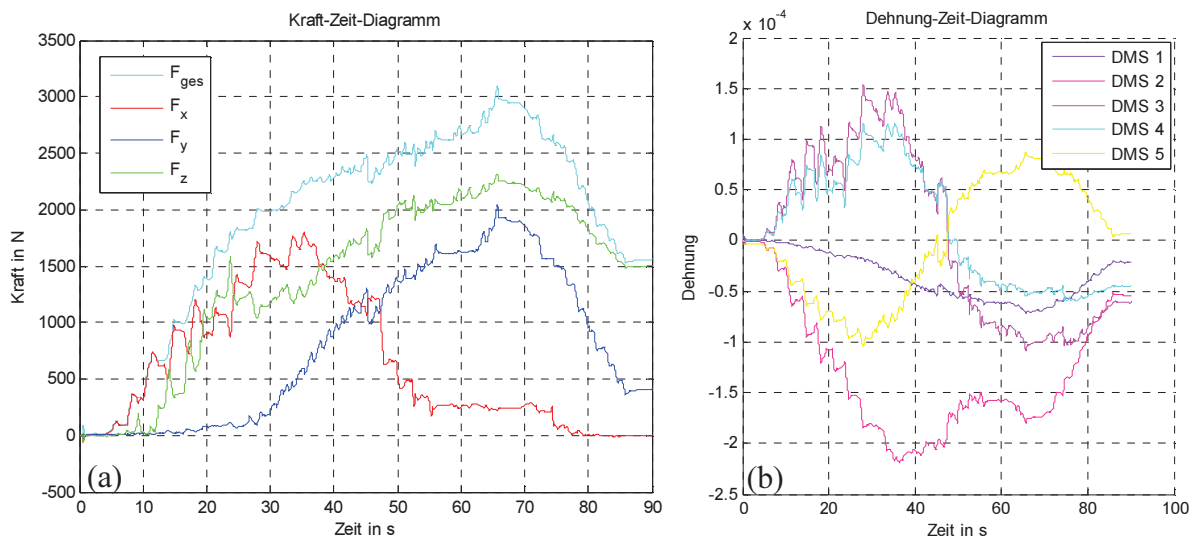
**Bild 8: Dehnungs-Kraft-Verlauf in verschiedene Raumrichtungen**

**Tabelle 1: Vergleich der numerisch und experimentell ermittelten Übertragungsmatrix**

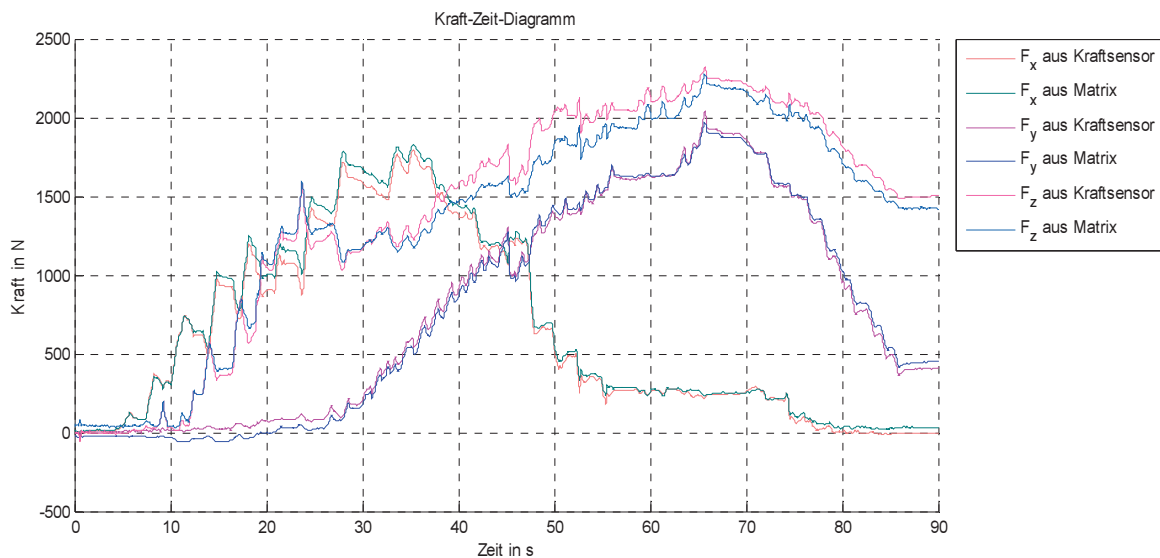
Richtung	DMS 1		DMS 2		DMS 3		DMS 4		DMS 5	
Exp./ Num.	Exp.	Num.	Exp.	Num.	Exp.	Num.	Exp.	Num.	Exp.	Num.
X	-3	-15	-91	-30	109	16	85	23	-52	-22
Y	-31	-17	-62	-19	-24	0	0	10	69	55
Z	-7	-15	-16	-8	-38	-22	-33	-22	-16	-17

### 5.3 Lastbestimmung mit der inversen Matrixmethode

Mit Hilfe des experimentell ermittelten Übertragungsverhaltens wird anschließend eine beliebige eingeleitete Kraft bestimmt. Bild 9(a) zeigt den Kraft-Zeit-Verlauf einer solchen Belastung und die zugehörigen Komponenten in den Koordinatenrichtungen. Die sich ergebenden Dehnungen sind in Bild 9(b) dargestellt. Unter Verwendung der experimentell bestimmten Übertragungsmatrix ergeben sich die in Bild 10 dargestellten Kraftkomponenten, die eine sehr gute Übereinstimmung mit den über die Kraftdosen ermittelten Kräfte aufweisen. Insbesondere in x- und y-Richtung ist im gesamten Zeitbereich eine sehr gute Übereinstimmung sichtbar. Im Bereich von 40-60s treten bei der Kraft in z-Richtung Abweichungen von ca. 10% auf, was auf Grund der geringen Dehnungen erwartet werden konnte. Damit wurde gezeigt, dass die bestimmten DMS-Positionen geeignet sind, um die auf das Bauteil wirkenden Kräfte zu ermitteln. Alle Kraftkomponenten konnten gut über die Dehnungen bestimmt werden.



**Bild 9: Beliebige Belastung und deren Komponenten und die zugehörigen Dehnungen**



**Bild 10: Vergleich der Kraftkomponenten die mit den Kraftsensoren und den DMS ermittelt wurden**



## 6. Ergebnisse

Es wurde eine Möglichkeit vorgestellt, die in ein Bauteil eingeleiteten Kräfte mit Hilfe von DMS, welche unter Zuhilfenahme der FEM hinsichtlich ihrer Position und ihres Winkels optimiert wurden, zu bestimmen. Als Anwendungsbeispiel für dieses allgemeingültige Konzept dient die Hinterachse eines Smart MC450. Die mit Hilfe der DMS bestimmten Dehnungen erlauben durch die Verwendung einer Übertragungsmatrix den Rückschluss auf die eingeleiteten Kräfte. Idealerweise hat eine solche Übertragungsmatrix sowohl eine hohe Norm als auch eine geringe Kondition. Auf Grund der Unabhängigkeit von Norm und Kondition lassen sich nicht beide Parameter gleichzeitig optimieren, weshalb eine Fehlerabschätzung vorgestellt wurde, die eine Berücksichtigung der im Experiment auftretenden relativen und absoluten Fehler ermöglicht.

Für die numerische Abschätzung der Dehnungen, die für die Optimierung eine entscheidende Rolle spielen, wurde der Dehnungstensor verwendet, wodurch auf einfache Weise die Dehnung in beliebige Richtungen und an beliebigen Punkten bestimmt werden können. Eine Abschätzung der Rechenzeit, dieser Optimierung, kann durch die Bestimmung der möglichen Permutationen durchgeführt werden. Die bestimmten DMS-Positionen und Winkel wurden am Achsprüfstand appliziert, um die numerisch ermittelten Dehnungen mit den experimentellen vergleichen zu können. Auf Grund von großen Dehnungsgradienten und Ungenauigkeiten bei der Positionierung und der Modellierung gibt es deutliche Abweichungen zwischen numerisch und experimentell bestimmter Übertragungsmatrix.

Diese Abweichungen machen eine experimentelle Bestimmung der Übertragungsmatrix unabdingbar. Es wurde gezeigt, dass im untersuchten Bereich ein linearer Zusammenhang zwischen eingeleiteter Kraft und gemessener Dehnung besteht, wodurch die Übertragungsmatrix unter Verwendung der linearen Regression bestimmt werden kann. Außerdem konnten die Lastkomponenten einer beliebigen Belastung unter Verwendung der gemessenen Dehnungen und der bestimmten Übertragungsmatrix bestimmt werden. Dazu wurden die gemessenen Kräfte der Kraftmessdosen mit den mit Hilfe der gemessenen Dehnungen bestimmten Kräften verglichen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass mit der inversen Matrixmethode die Lasten bestimmt werden können, die in ein Bauteil eingeleitet werden. In weiteren Arbeiten soll diese Methode am realen Fahrzeug angewendet werden. Dort kann sie mit Hilfe eines Messrades, welches die vorgestellte Methode auf Grund des hohen Kostenfaktors ersetzen soll, validiert werden. Diese Methode ist gegenüber den kommerziellen Messrädern vergleichsweise kostengünstig. Durch die Anbringung der Messeinrichtung an der Achse, ist eine Beschädigung der Messeinrichtung auch bei extremen Fahrmanövern unwahrscheinlich. Nachteilig an diesem System ist, dass es, anders als ein Messrad, ausschließlich für ein Fahrzeug verwendet werden kann. Für jedes weitere Fahrzeug ist das Applizieren neuer DMS erforderlich. Außerdem ist auf Grund der verwendeten Viertelbrücken ein häufiges Kalibrieren notwendig, weil Temperatureinflüsse nicht kompensiert werden. Der größte Vorteil dieses Messverfahrens besteht jedoch darin, dass es nicht ausschließlich für die Bestimmung von Radlasten verwendet werden kann, sondern universell einsetzbar ist.

## 7. Danksagung

Das Leitvorhaben COmpetence in MObility - COMO III wird im Rahmen des Operationellen Programms aus Mitteln des europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und des Landes Sachsen-Anhalts (ZS/2016/04/78118) gefördert.

## Literaturverzeichnis

- [1] Keil, Stefan. Dehnungsmessstreifen. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2016
- [2] Späth, Ralf. "Instrumented Wheel for the Measurement of Rear Axle Wheel Force." Agrartechnische Forschung 7 (2001)
- [3] Steinkampf, H. "Messung räumlich wirkender Kräfte zwischen Schlepper und Gerät. Grundl." Landtechnik 21 (1971): 71-76
- [4] Kumar, Ashutosh, et al. "Design studies and optimization of position of strain gauge." Int. J. Sci. Eng. Res 3 (2012): 1-4
- [5] Szwedowicz, J., S. M. Senn, and R. S. Abhari. "Optimum strain gage application to bladed assemblies." TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS JOURNAL OF TURBOMACHINERY 124.4 (2002): 606-613
- [6] Schrand, David. "Cross-Talk Compensation Using Matrix Methods" Sensors & Transducers Journal Vol. 79, 2007, pp. 1157-1163
- [7] Wan, Yieh-Hei. "On local Pareto optima." Journal of Mathematical Economics 2.1 (1975): 35-42