

PRÄZISE KRAFTMESSUNG MIT DMS

Anwendungen und Applizieren von Dehnungsmessstreifen

Simon Scheerer (M.Eng.)
Dr. Markus Röck

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	2
2	DMS bei RAFI	3
	• RAFI-Anwendungen	3
	• Herausforderungen	3
	• Arten von DMS	4
3	Applizieren von Dehnungsmessstreifen	5
	• Prozessablauf	5
	• Temperaturlagerung	5
	• Oberflächenbearbeitung	6
	• Reinigung der Oberfläche	7
	• Aufbringen des Dehnungsmessstreifen	8
	• Aushärten des Klebstoff - Klebeprozess	8
	• Nachhärten - Tempern	9
	• Verdrahtung des Dehnungsmessstreifen	10
	• Schutz vor Feuchte	10
	• Testen und Kalibrieren	10
4	Fazit	11
5	Literaturverzeichnis	11

1 Kurzfassung

Das Applizieren von Dehnungsmessstreifen (DMS) ist von entscheidender Bedeutung für die Herstellung von Kraftsensoren, da diese Technologie präzise und zuverlässige Messungen von mechanischen Belastungen ermöglicht. Dehnungsmessstreifen, oft auch als DMS bezeichnet, sind äußerst empfindliche Messinstrumente, die auf Veränderungen in der Geometrie des Materials reagieren, an dem sie angebracht sind. Wenn eine Kraft auf ein Objekt wirkt, verursacht sie eine Verformung, die in Form einer Dehnung oder Stauchung gemessen werden kann. Die Dehnungsmessstreifen wandeln diese mechanischen Deformationen in elektrische Widerstandsänderungen um, die wiederum in proportionale elektrische Signale konvertiert werden.

Wesentliche Vorteile von Dehnungsmessstreifen sind ihre hohe Genauigkeit und Empfindlichkeit. Sie ermöglichen es, auch kleinste Dehnungen zu erfassen, was besonders wichtig ist, um präzise und wiederholbare Messungen zu gewährleisten. Diese Genauigkeit ist entscheidend für Anwendungen, bei denen eine exakte Kraftmessung notwendig ist.

Weitere wichtige Aspekte sind die Robustheit und Langlebigkeit von Dehnungsmessstreifen. Sie sind in der Lage, auch unter extremen Bedingungen, wie hohen Temperaturen oder korrosiven Umgebungen, zuverlässig zu funktionieren. Dies macht sie ideal für den Einsatz in anspruchsvollen Umgebungen und stellt sicher, dass die Kraftsensoren über lange Zeiträume hinweg genaue und stabile Messungen liefern.

Die herausragenden Eigenschaften einer Kraftmessung mit DMS-Sensoren setzen jedoch eine qualitativ hochwertige Verbindung des DMS-Sensors mit der Oberfläche des Grundkörpers voraus. Der Sensor muss direkt auf dem Metall sitzen. Fremdpartikel, Oxide oder ungeeignete Oberflächenstrukturen verändern die Messungen direkt.

Durch die Herstellung von genauen weglosen Joysticks hat RAFI jahrzehntelange Erfahrung im Aufbringen der DMS-Sensoren. Basierend auf diesen Erfahrungen entstanden automatisierte Prozesse zur Herstellung von DMS-Sensoren im High-Volume-Bereich.

2 DMS bei RAFI

RAFI-Anwendungen

Als großer Hersteller von Human Machine Interfaces hat RAFI neben Schaltern, Tastaturen und Touchbedienungen auch Joysticks im Portfolio. Neben den wegbasierten Joysticks gibt es auch die kraftbasierte Eingabe. Hier werden Dehnungsmessstreifen auf die Joystickwellen appliziert und die Kraft gemessen. Je nach Anwendung wird eine Verdrehung der Joystickachse oder eine gerichtete Kraft gemessen. Neben den Anwendungen im Joystick hat RAFI außerdem Kraftmessungen für elektrische Antriebe für hohe Stückzahlen umgesetzt. Diese Art von Anwendungen wird mit der fortschreitenden Elektrifizierung steigen, da die Kraft oft eine wichtige Regelgröße darstellt.



Abbildung 1: Beispiel Armrest mit komplexem RAFI-Joystick, der eine Kraft beim Verdrehen der Joystickachse misst

Herausforderungen

Die Qualität der Messdaten bei einem DMS-Sensor hängt stark von den Faktoren mechanisches System, elektronische Verarbeitung der Signale und Fertigungsprozess ab.

Hier war die Automatisierung des Aufbringens der DMS-Sensoren die Herausforderung. Die Randbedingungen der Qualität von DMS-Sensorsignalen (Dehnungsmessstreifen) sind entscheidend für präzise Messungen und zuverlässige Daten. Zu den wichtigsten Faktoren zählen Temperaturstabilität, da Temperaturschwankungen die Signalgenauigkeit beeinflussen können, sowie mechanische Spannungen, die eine korrekte Montage und Kalibrierung erfordern. Die Signale der DMS-Sensoren sind im einstelligen mV-Bereich und müssen verstärkt werden. Daher ist es wichtig, Rauschen und Signalverzerrungen zu verhindern. Die Qualität der Signalverarbeitungselektronik spielt eine Rolle, da sie die Genauigkeit und Auflösung der Sensorsignale direkt beeinflusst.

Alle diese Randbedingungen müssen sorgfältig kontrolliert werden, um die bestmögliche Qualität der Messdaten zu gewährleisten.

Arten von DMS

Bei den Dehnungsmessstreifen gibt es unterschiedliche Arten und Formen. DMS können beim Hersteller als Einzelemente (Viertelbrücke, Halbbrücke und Vollbrücke) bestellt werden. Zusätzlich gibt es Unterschiede bei den Strukturen für die Messrichtung. In Abbildung 2 wird ein Überblick über die gängigen Dehnungsmessstreifen gegeben. Bei den jeweiligen DMS-Herstellern gibt es eine weitaus größere Auswahl an Dehnungsmessstreifen.

Beispielsweise gibt es DMS für eine lineare Messung (siehe Abbildung 2a), wie sie bei der Biegespannung zum Einsatz kommt. Es gibt auch Strukturen, bei denen zwei Messgitter um 45° zur Messachse versetzt sind, um Torsions- oder Schubspannungen zu messen (siehe Abbildung 2b).

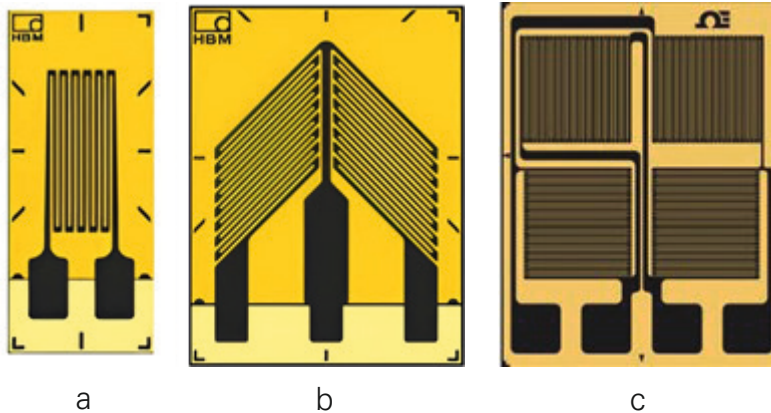


Abbildung 2: unterschiedliche Dehnungsmessstreifen

- (a) Mäander für Messung von Biegespannung
- (b) Messung von Torsions- und Schubspannung
- (c) Vollbrücke mit 4 Mäander

3

Applizieren von Dehnungsmessstreifen

Prozessablauf

Das Aufbringen von Dehnungsmessstreifen ist in den meisten Fällen ähnlich, dennoch können einzelne Schritte abweichen. Dies hängt mit der Art und Weise zusammen, wie die DMS angebracht werden. Abbildung 3 zeigt einen für das Aufkleben von Dehnungsmessstreifen in der Industrie üblichen Standardablauf.

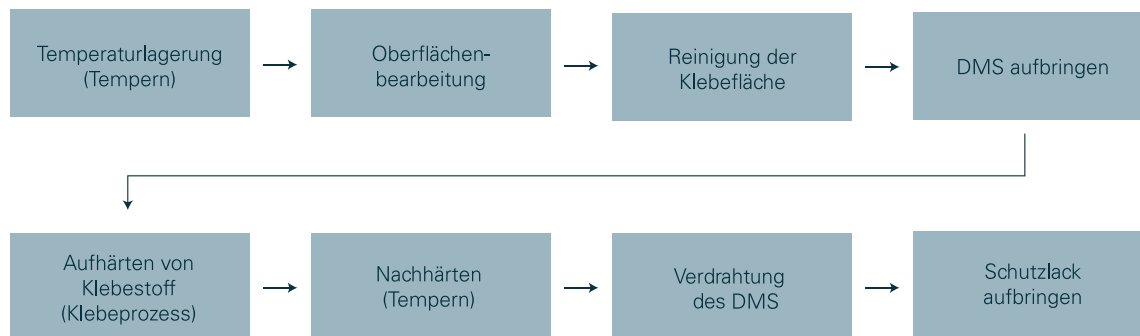


Abbildung 3: Prozessablauf

Temperaturlagerung

Im ersten Schritt wird eine Temperaturlagerung durchgeführt. Aus der Erfahrung ergibt sich, dass eine Temperaturlagerung bei 180 °C für ca. 2 h bei Aluminium ein gutes Ergebnis liefert. Je nach Material muss jedoch die richtige Temperatur ermittelt werden. Dadurch sollen sich Vorspannungen im Material lösen, die z. B. während der Herstellung des Messobjekt auftreten. Diese Vorspannungen haben einen negativen Einfluss auf die Messung und können zu einem späteren Zeitpunkt nicht mehr gelöst werden.

Oberflächenbearbeitung

Für die Oberfläche wird bei einem Epoxidharz-Klebstoff eine bestimmte Oberflächenrauheit benötigt. Diesbezüglich findet man in der Literatur unterschiedliche Angaben. So beschreibt Reinhard Kaufmann für diesen Klebstoff eine Oberflächenrauheitstiefe von „0,4 μm bis 1,6 μm “ (Kaufmann, 2024), wohingegen Stefan Keil eine mittlere Rautiefe von „2 μm bis 4 μm “ (Keil, 2017) empfiehlt. Diese Oberflächenstruktur kann durch Prozesse wie Sandstrahlen, Schleifen oder mit einem Laser realisiert werden.

Manueller Prozess

Der einfachste Prozess ist hier, mit einem Schleifpapier einer bestimmten Körnung die gewünschte Rauheit zu erreichen. Beim Arbeiten mit dem Schleifpapier muss darauf geachtet werden, dass keine Vorzugsrichtung in das Material eingearbeitet wird.

Automatisierung

Sandstrahlen und Lasern sind die komplexeren Prozesse. Es müssen für das jeweilige Verfahren geeignete Anlagen zur Verfügung stehen und Erfahrungswerte für die jeweiligen Materialien gesammelt werden. Um diesen Schritt zu umgehen, kann bereits beim mechanischen Herstellen des Grundkörpers eine benötigte Oberflächenrauheit sichergestellt werden.

Zusätzlich muss bei der Oberfläche, nachdem die gewünschte Rauheit erreicht wurde, die Oxidschicht vom Messobjekt entfernt werden. Dafür kann wieder das Schleifpapier zur Anwendung kommen. Allerdings muss darauf geachtet werden, dass keine Vorzugsrichtung im Material entsteht. Eine Alternative zum Schleifpapier ist eine Laserreinigung der Oberfläche. Dabei müssen, wie bei der Rautiefe, die entsprechenden Parameter ermittelt werden. Die Laserreinigung ist für einen Serienprozess deutlich besser geeignet, da das Ergebnis immer identisch ist und nicht wie beim Schleifpapier von Mitarbeiter zu Mitarbeiter abweichen kann. Die Oxidschicht ist nur wenige nm dick. Da die Oxidschicht sehr harte Eigenschaften aufweist, die sich negativ auf die Übertragung der mechanischen Dehnung auf den DMS auswirken können, muss diese komplett entfernt werden. Durch das Entfernen der Oxidschicht kann eine dämpfende Eigenschaft ausgeschlossen werden (Kaufmann, 2024) (Keil, 2017).

Reinigung der Oberfläche

Direkt im Anschluss an die Oberflächenbehandlung, muss die Klebefläche mit einem entsprechenden Mittel gereinigt werden. Für diese Anwendung eignet sich Isopropylalkohol als gutes Reinigungsmittel. Dieser befreit die Klebestelle von Unreinheiten und Fetten.

Manueller Prozess

Für diese Reinigungsmittel müssen die entsprechenden Arbeitsanweisungen berücksichtigt werden. Für die Reinigung der Oberfläche eignen sich besonders gut Wattestäbchen. Diese werden einmalig mit Reinigungsmittel getränkt, damit nach dem Reinigungsprozess die Partikel, welche am Wattestäbchen hängen, die Reinigungsmittel nicht verunreinigen. Nachdem die Oberfläche mit dem Wattestäbchen gereinigt wurde, muss dieses entsorgt werden. Dieser Prozessschritt wird so lange wiederholt, bis am Wattestäbchen keine Rückstände mehr zu finden sind. Danach wird der Reinigungsschritt ein allerletztes Mal ausgeführt um sicherzustellen, dass sich keine Rückstände mehr auf der Klebestelle befinden (Kaufmann, 2024) (Keil, 2017).

Automatisierung

Durch den Einsatz der Laserreinigung kann die Anzahl der Reinigungsschritte minimiert werden. Das Grundmaterial wird nicht abgetragen, und die Oxidschicht wird durch den Laser verdampft. Für die Reinigung der Klebestelle kann alternativ ein Ultraschallbad genutzt werden. Dadurch ist es möglich, den Prozess zu automatisieren, um immer eine konstante Reinigungsqualität zu erreichen. Allerdings muss die Wirtschaftlichkeit geprüft werden, um festzustellen, ab welcher Stückzahl sich die automatisierte Reinigung im Vergleich zur händischen Reinigung rechnet.

Aufbringen des Dehnungsmessstreifen

Der DMS muss auf der Klebeseite frei von Rückständen sein. Dies gilt auch für die Klebestelle auf dem Messobjekt. Daher empfiehlt es sich, diesen nicht mit den Fingern zu berühren, sondern ein Hilfswerkzeug, wie z. B. eine Pinzette, zu verwenden. Die Anwendungshinweise des Herstellers für den jeweiligen Klebstoff müssen eingehalten werden. Verwendet man zum Beispiel den M-Bond 610, wird dieser gleichmäßig auf der Rückseite des DMS sowie auf dem Messobjekt aufgetragen. Danach lässt man beides noch für einige Minuten an der Luft liegen, damit sich die Lösemittel im Klebstoff auflösen und an der Luft verdampfen.

Sie müssen vollständig verdampft sein, damit sich später im Ofen beim Klebeprozess durch die Gase keine Luftblasen bilden. Diese hätten einen negativen Einfluss auf das Messergebnis. Danach wird der DMS an der entsprechenden Stelle auf dem Messobjekt platziert und mit einer Vorrichtung auf die Klebestelle gedrückt. Hier wird ein Anpressdruck von 3 bis 4 bar empfohlen (Kaufmann, 2024). Die DMS-Hersteller empfehlen einen Anpressdruck von 5 bar für den Kleber, um eine bessere Anpassung des DMS an die Oberfläche des Messobjekts zu gewährleisten. Diese Empfehlung basiert jedoch nur auf Erfahrungswerten und muss daher nicht verbindlich übernommen werden.



Abbildung 4: automatisiertes Aufbringen mit Vakuumpipette

Aushärten des Klebstoffs - Klebeprozess

Beim Aushärten des Klebstoffs ist ein konstanter Anpressdruck (3-5 bar) notwendig, um eine homogene Klebung zu erzeugen. Hierfür wird eine entsprechende Vorrichtung benötigt, um den DMS über die Zeit im Ofen zu fixieren und anzupressen. Um diesen konstanten Druck aufrechtzuerhalten, wird eine Konstruktion bevorzugt, in der ein Federelement enthalten ist. Zwischen den Metallplatten und der Feder sollten sich noch eine dünne Teflonfolie und ein Silikonkissen befinden. Dadurch wird der Dehnungsmessstreifen optimal angepresst und passt sich der Oberfläche entsprechend an. Durch die Vorteile von Teflon wird sichergestellt, dass der DMS nach dem Kleben nicht am Silikonkissen festklebt und die Anpressvorrichtung einfacher entfernt werden kann.

Durch die gleitenden Eigenschaften von Teflon wirken keine Querkräfte auf den DMS ein, was sich positiv auf das Messergebnis auswirkt. Das Silikonkissen bietet einen Schutz vor den Metallplatten, damit diese nicht direkt auf den DMS einwirken (Kaufmann, 2024). Durch die Feder wird über die Temperatur und Zeit hinweg der Anpressdruck auf konstantem Niveau gehalten. Da sich bei einer höheren Temperatur die Materialeigenschaften der Feder und des Silikons ändern, wird der Anpressdruck über die Zeit abweichen und nicht mehr dem eingestellten Druck bei Raumtemperatur entsprechen (Kaufmann, 2024). Wichtig sind die Liegezeit und Temperatur im Ofen. Je nach Klebstoff kann durch die Höhe der Temperatur die Zeit verkürzt werden. Bei Epoxidharz-Klebstoffen sollte die Temperatur mind. 30 K über der maximalen Anwendungstemperatur liegen (Keil, 2017). Es müssen aber die Anweisungen vom Hersteller befolgt werden. Das Messobjekt muss im Ofen auf mindestens 50 °C abgekühlt sein, bevor die Anpressvorrichtung entfernt werden darf.

Nachhärten - Tempern

Das Tempern erfolgt wie im vorherigen Schritt ebenfalls bei einer Temperatur, die mind. 30 K über der Aushärtetemperatur liegt, und dauert etwa zwei Stunden (Keil, 2017). Hier ist es empfehlenswert eine Temperatur von ca. 180 °C bei Aluminium zu verwenden. Wichtig ist bei diesem Schritt, dass die Temperaturlagerung ohne Anpressdruck erfolgt. Dadurch werden mechanische „Restspannungen“ (Kaufmann, 2024) die im DMS entstanden sind, eliminiert bzw. stark reduziert. Diese Spannungen entstehen durch das Anpressen des DMS sowie bei der Polymerisation des Klebstoffs (Kaufmann, 2024). Da sich diese Restspannung nicht verhindern lässt, muss dieser Schritt auf jeden Fall nach dem Klebeprozess erfolgen. Vorteilhaft hierbei ist, dass das Messobjekt direkt in einen bereits aufgewärmten Ofen gelegt werden kann, wodurch keine schrittweise Erhöhung der Temperatur notwendig ist (Kaufmann, 2024). Zusätzlich wird durch das Nachhärten die Langlebigkeit der Klebestelle verbessert (Keil, 2017).

Verdrahtung des Dehnungsmessstreifen

In den meisten Anwendungen wird auf das Lötverfahren gesetzt. Das Drahtbonden kann hinsichtlich der Prozesssicherheit und Durchlaufzeit einen deutlichen Mehrwert darstellen. Es hat den Vorteil, dass keine Lötpaste, Flussmittel usw. benötigt werden. Aufgrund von Löt-pasten- oder Flussmittlrückständen müssen Reinigungsprozesse an der Leiterplatte und am DMS durchgeführt werden. Diese Rückstände können sich negativ auf den Kriechstrom oder den Isolationswiderstand auswirken. Der Isolationswiderstand kann einen negativen Einfluss auf das Messergebnis haben. Diese Einflüsse können sich erst später im Produkt bemerkbar machen. Zusätzlich können je nach Stückzahlen vollautomatisierte Anlagen genutzt werden, was zu einem größeren wirtschaftlichen Gewinn in der Serienfertigung führen kann.



Abbildung 5: Drahtbonden als Verbindungstechnik für die Serienfertigung

Schutz vor Feuchte

Im letzten Schritt wird ein Schutzlack über die Messstelle des Messobjekts aufgetragen, der den DMS vor Umwelteinflüssen schützen soll. Dieser Punkt muss sehr ernst genommen werden. Die Luftfeuchtigkeit kann sich sehr negativ auf die „Langzeit-Nullstabilität auswirken“ (Kaufmann, 2024). In den meisten Fällen handelt es sich um einen Folien-DMS, dabei besteht die Folie bei vielen DMS aus Polyimid. Dieses Grundmaterial kann Feuchtigkeit aufnehmen, was zu einer räumlichen Ausdehnung führt. Diese Ausdehnung wird auf die DMS-Strukturen übertragen, und es kommt zu einer vorgetäuschten Dehnung. Der Schutzlack wird entsprechend den Anforderungen ausgewählt. Alternativ werden bei Serienfertigungen auch komplette Bereiche als Schutz vor Umwelteinflüssen vergossen.

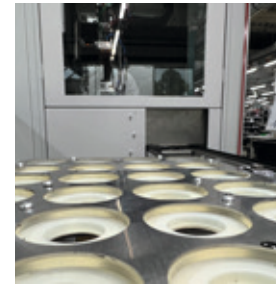


Abbildung 6: automatisierter Verguss als Alternative zum Lackieren

Testen und Kalibrieren

Infolge der mechanischen Einflüsse auf die Dehnungstreifen manifestiert sich ein geringer Offset, der durch die vorangegangene Temperaturlagerung minimiert werden kann, jedoch ist eine vollständige Eliminierung nicht möglich. Der Offset der Brückenschaltung muss durch eine entsprechende Messung ermittelt werden, um im Anschluss die Nullstellung des Joysticks kalibrieren zu können.

Ähnliches gilt für die Temperaturabhängigkeit der Messung. Hier gibt es zwei Strategien:

- die Temperaturabhängigkeit des Systems durch geeignete Maßnahmen wie die Verwendung eines Vollbrücken-DMS-Sensors reduzieren
- mit einem zusätzlichen Temperatursensor und einer Kalibrierung über die Temperatur die Toleranzen herausrechnen

4 Fazit

Um eine hohe Genauigkeit über eine lange Lebensdauer mit DMS-Sensoren (Dehnungsmessstreifen) zu gewährleisten, sind mehrere Faktoren entscheidend. Zu den wichtigsten Faktoren zählen Temperaturstabilität, da Temperaturschwankungen die Signalgenauigkeit beeinflussen können, sowie mechanische Spannungen, die eine korrekte Montage und Kalibrierung erfordern. Zunächst ist die Wahl des richtigen Sensors und dessen sorgfältige Kalibrierung essenziell, um präzise Messungen zu ermöglichen. Die korrekte Montage auf der Oberfläche des zu messenden Objekts ist ebenfalls von großer Bedeutung, wobei eine gleichmäßige Verteilung des Klebstoffs und das Vermeiden von Luftblasen sicherzustellen sind.

Temperaturstabilität spielt eine zentrale Rolle, da Temperaturschwankungen die Messergebnisse verfälschen können. Der Einsatz hochwertiger Klebstoffe und Schutzbeschichtungen ist notwendig, um die Langzeitstabilität zu sichern und Umwelteinflüsse durch Feuchtigkeit und chemische Substanzen zu minimieren.

Darüber hinaus müssen elektromagnetische Interferenzen (EMI) minimiert werden, um Signalrauschen zu reduzieren. Hochwertige Signalverarbeitungselektronik und geeignete Filter tragen ebenfalls zur Verbesserung der Messgenauigkeit bei. Regelmäßige Wartung und Kalibrierung des Systems sind erforderlich, um die langfristige Genauigkeit zu gewährleisten. Zusammen sichern diese Maßnahmen eine hohe Präzision und Langlebigkeit der DMS-Sensorsignale.

5 Literatur

Kaufmann, R. (2024). DMS-Installationsverfahren für Messwertaufnehmer. Von <https://www.reinhardkaufmann.de/PDF%20Files/MWA/DMS-Installationsverfahren%20fuer%20Messwertaufnehmer.pdf>

Keil, S. (2017). Dehnungsmessstreifen. Wiesbaden: Springer Vieweg.