

3. Meßgeräte und -verfahren für die Messung mechanischer Größen bei Landmaschinenuntersuchungen

Die Meßgeräte und -verfahren für die wichtigsten Größen werden hier in vier Gruppen unterteilt.

3.1. Meßgeräte und -verfahren für Kräfte, Drücke, Momente

Für die Messung dieser Größen in den hier meistens vorkommenden Größenordnungen wären einfache mechanische Geräte durchaus anwendbar, sie wurden auch lange Zeit benutzt. Besonders die Nachteile der schlechten Meßwertübertragung, die nicht mehr ausreichenden dynamischen Verhaltensweisen und die Schwierigkeiten infolge des empfindlichen Aufbaus von Feinmeßgeräten bei Anbau an landwirtschaftlichen Maschinen haben zum Unaktuellwerden geführt, zumal es Besseres gibt.

Das Messen mit hydraulischen Übertragungselementen wird nur noch recht selten angewendet, sei aber noch kurz erwähnt. Als Anzeige- oder Registriereinrichtungen werden Manometer mit Bourdonfeder, Federbalg, Dose oder Hubzylinder verwendet, in handelsüblicher Bauweise, aber auch als Sonderanfertigungen in geeigneter kleiner Bauweise [5]. Als Meßwertaufnehmer, die die Umwandlung der Kräfte bzw. Momente in einen entsprechenden Druck vornehmen, kamen zum Einsatz Geber vom MAW Magdeburg bzw. direkt für landtechnische Untersuchungen im Auftrage der Prüfdienststelle in Potsdam-Bornim entwickelte Geber, über die bei Interesse in [5] [6] Näheres nachzulesen ist.

Pneumatische Meßgeräte wurden bisher kaum eingesetzt, weil die hierzu notwendige Technik und die Geräte nicht verbreitet sind. Die üblichen Prinzipien für pneumatische Meßwertaufnehmer zur Messung von Kräften, Wegen und abgeleiteten Größen sind im Bild 5 dargestellt.

Anzeigen und Registrieren der erzeugten Drücke erfolgen wieder mit den üblichen Manometerprinzipien, oder es erfolgt eine Wandlung in elektrische Größen.

Wir wollen uns nun den derzeit am besten geeigneten elektrischen Verfahren zuwenden. Die zur Messung der hier zu behandelnden Größen hauptsächlichsten Meßprinzipien sind im Bild 6 zusammengestellt, sie sollen nachfolgend erläutert werden.

3.1.1. Dehnungsmeßstreifen

3.1.1.1. Grundsätzliches zur Anwendung von Dehnungsstreifen

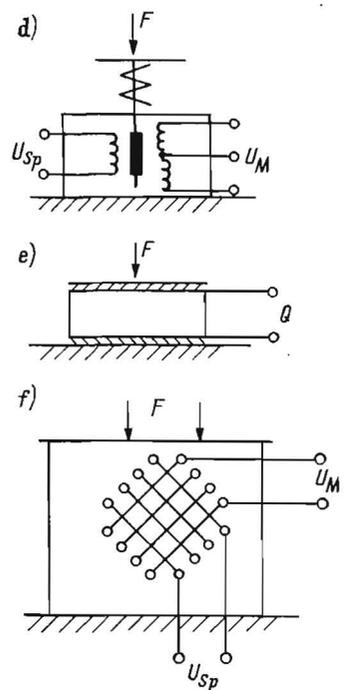
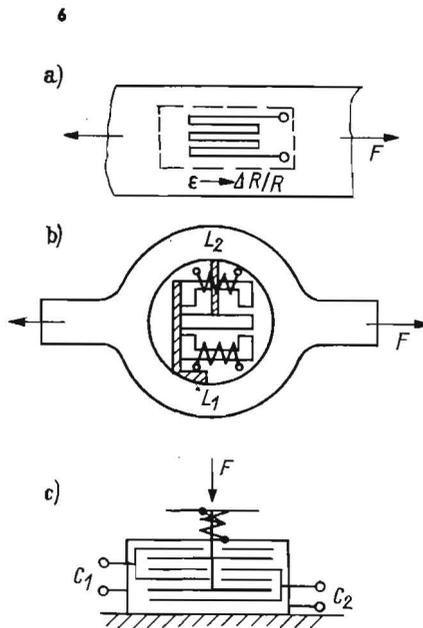
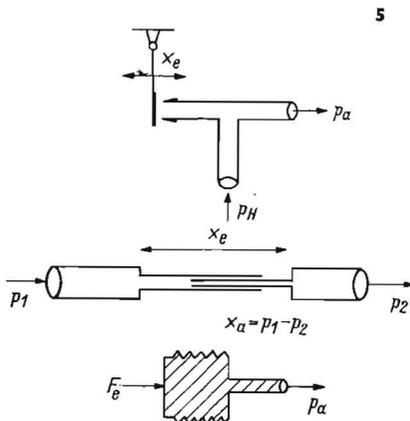
Dieses Verfahren hat wegen seiner Zuverlässigkeit, der guten Anwendbarkeit und vor allem wegen der in Hinblick auf die Rückwirkungsfreiheit und Dynamik günstigen Eigenschaften eine sehr weite Verbreitung gefunden. Die industriell in verschiedenster Form hergestellten Dehnungsmeßstreifen werden auf Konstruktionsteile selbst oder auf besonders gefertigte Aufnehmerkörper geklebt und dehnen sich entsprechend der Verformung des Teils, die sich aus den durch die angreifenden Kräfte, Momente oder Drücke hervorgerufenen Spannungen ergibt. Es können mit entsprechenden Schaltungen und dazu gefertigten Geräten Dehnungen von weniger als 1/100% gemessen werden. Das Aufkleben verlangt einige Sorgfalt und praktische Erfahrung, die sich aber jeder schnell aneignen kann. Anleitung hierfür sowie Beschreibungen der Arten von Dehnungsmeßstreifen und ihre Verwendbarkeit vermittelt die Literatur [7] [8] [9] [10]. Beim Messen von Kräften und den anderen Größen an den Konstruktionsteilen direkt ist die Auswahl der Meßpunkte oft entscheidend. Hierzu sind Überlegungen notwendig, wie die mechanischen Spannungen und damit die Dehnungen mit den gesuchten Komponenten in Zusammenhang stehen, denn vielfach läßt sich durch Wahl der Meßpunkte eine ungewollte Beeinflussung vermeiden. Weitere Möglichkeiten bieten Kombinationen mehrerer Meßstreifen in bestimmten Schaltungen, die noch anhand von Beispielen erläutert

* Sektion Landtechnik der Universität Rostock
(Direktor: Prof. Dr.-Ing. CHR. EICHLER)
¹ Teil I in Heft 5, S. 223

Bild 5. Pneumatische Meßwertaufnehmer

Bild 6. Elektrische Meßwertaufnehmer für Kräfte

a) Dehnungsmeßstreifen, b) induktiver Zugkraftmesser, c) Differentialkondensator als Kraftmeßfühler, d) Differentialtransformator, e) Piezoelektrischer Druckaufnehmer, f) magnetoelastischer Druckaufnehmer



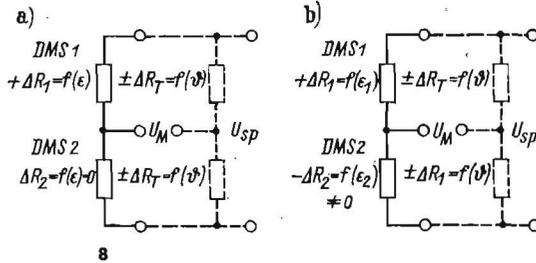
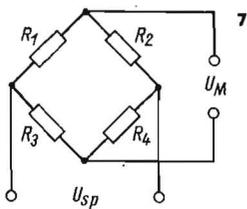


Bild 7. Brückenschaltung zur Umwandlung einer Widerstandsänderung in eine Meßspannung;
 $R_{10} = R_{20} = R_{40} : U_M = 0$
 $R_1 = R_{10} + \Delta R, R_2 = R_3 = R_4 = R_{10}$
 und

$$\frac{\Delta R}{R_{10}} \ll 1 : U_M = \frac{U_{sp}}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R_{10}}$$

Bild 8. Halbbrücke mit passivem und aktivem Kompensationsstreifen

werden sollen. Beeinflusst wird die Wahl des Meßpunktes natürlich auch durch die Möglichkeit der Befestigung der Streifen selbst und der Zuleitungen, die vorhandenen Umwelteinflüsse, wie Temperatur, Öl, Schmutz, Feuchtigkeit usw.

Da die Schaltung, das ist die Art der elektrischen Verbindungen, entscheidend ist für die Elimination unerwünschter Effekte, wie Temperatureinflüsse, nicht zu messender Kraftkomponenten oder sonstiger Effekte, muß sich hier der Anwender etwas eingehender mit den elektrischen Erscheinungen beschäftigen. Er muß, wie es heute von jedem Ingenieur verlangt wird, Grundkenntnisse über die Vorgänge in elektrischen Stromkreisen besitzen. Durch die Dehnung bzw. Stauchung der Dehnungsmessstreifen wird eine Widerstandsänderung ($+\Delta R$ bzw. $-\Delta R$) bewirkt, die bei gewöhnlichen Dehnungsmessstreifen in der Größenordnung der Dehnungen selbst liegt, also weniger als 1‰ und bei Halbleiterdehnungsmessstreifen bis zu einigen Hundert ‰ betragen kann, wenn sie als relativer Wert, also $\Delta R/R$ angegeben wird (R ist der Streifenwiderstand in ungedehntem Zustand). Diese kleinen Änderungen werden durch Brückenschaltungen meßbar. Die Brückenschaltung ermöglicht auch das Bestimmen der Widerstandsänderung durch Messen der elektrischen Spannung. Brückenschaltung und Zusammenhänge zeigt Bild 7.

Die angezeigte Meßspannung U_M wird also nur weniger als 1‰ der Speisespannung U_{sp} betragen, wobei die Höhe der Speisespannung begrenzt ist durch die Strombelastbarkeit der Dehnungsmessstreifen I_{zul} :

$$\frac{U_{sp}}{R_1 + R_2} \leq I_{zul} \quad (1)$$

die vom Hersteller angegeben wird. Weiterhin nennt der Hersteller den Widerstandswert ($R = 50 \dots 600 \Omega$) und den sogenannten k -Faktor, der angibt, welcher Zusammenhang zwischen mechanischer Dehnung ϵ und Widerstandsänderung $\Delta R/R$ besteht. Es gilt die Gleichung

$$\Delta R/R = k \cdot \epsilon \quad (2)$$

Man kann damit die Meßspannung berechnen zu:

$$U_M = U_{sp} \frac{k \cdot \epsilon}{4} \quad (3)$$

Hierfür ein Zahlenbeispiel:

$I_{zul} = 40 \text{ mA}, R = 300 \Omega, k = 2$ dann wird

$$U_M = 40 \text{ mA} \cdot 600 \Omega \cdot 1/2 \cdot \epsilon$$

bei 1‰ Dehnung also $U_M = 120 \text{ mV}$.

Das Beispiel zeigt, daß sich für eine recht hohe Strombelastbarkeit und eine maximal noch vertretbare Dehnung von 1‰ für gewöhnliche Dehnungsmessstreifen erst eine Meßspannung von rund 100 mV ergibt. Im allgemeinen aber wird diese Meßspannung bis zu drei Zehnerpotenzen kleiner sein, so daß sie kaum noch verstärkerlos angezeigt werden kann und für die Aussteuerung dynamisch günstiger Registriergeräte bei weitem nicht mehr ausreicht. Nach der Entwicklung stabiler Verstärkeranlagen, die in den Dehnungsmessanlagen kombiniert sind mit den Speisespannungsvorsorgungseinrichtungen und dann am günstigsten als

Wechselspannungsquellen im Trägerfrequenzgebiet ausgelegt werden, bereitet aber diese Auswertung keine Schwierigkeiten mehr. So werden auch bei Landmaschinenuntersuchungen die von der Industrie entwickelten Dehnungsmessanlagen, die heute transistorisiert sind und nur geringe Speisespannungen benötigen, verwendet. Sie enthalten die genannten Baustufen (Speisespannungserzeugung, Trägerfrequenzverstärker) und die Ausgangsverstärker für gängige Registrier- und Auswertgeräte, weiterhin Anzeigeräte und Einrichtungen für die Brückenschaltungen und deren Abgleich. Dieser ist bei Wechselstrom etwas komplizierter, da auch die Schaltkapazitäten die Brücke beeinflussen und abgeglichen werden müssen. Die Handhabung wird in den Gerätebedienungsanleitungen eingehend beschrieben. Hier sei nur zu den Kapazitäten noch folgendes gesagt: Da die Schaltkapazitäten auch so ähnlich auf die Brücke wirken wie die Widerstände der Streifen, muß dafür gesorgt werden, daß sie sich nicht störend bemerkbar machen, das bedeutet, daß sie möglichst konstant bleiben sollen. Erreichbar ist das nur durch Abschirmen der Leitungen und möglichst stabile Lage zueinander sowie durch Verhindern eventueller Kapazitätsänderungen an den Streifen selbst durch bewegliche Teile oder aber vor allem durch Einwirken von Wasser, z. B. als Feuchtigkeit. Schon aus diesem Grunde, aber auch als Schutz vor mechanischen Schäden ist eine sorgfältige Abdeckung der aufgeklebten Streifen dringend notwendig.

3.1.1.2. Weitere Schaltungsmöglichkeiten von Dehnungsmessstreifen in Brückenschaltungen

Eine Brücke enthält also mindestens vier Widerstandselemente, wobei bei Wechselstromspeisung nicht nur die ohmschen Anteile Einfluß haben, sondern auch Induktivitäten und Kapazitäten.

Bei Schaltungen mit Dehnungsmessstreifen und üblichen Trägerfrequenzen von 5 bis 10 Hz werden jedoch vor allem die ohmschen Widerstandsänderungen ausschlaggebend sein, wenn man für den kapazitiven Abgleich sorgt. Man kann nur einen der vier Widerstände aber auch mehrere oder alle beeinflussen. Eine weit verbreitete Art der Schaltung ist die „Halbbrücke“. Hierbei werden zwei Widerstände durch Dehnungsmessstreifen gebildet, wobei anzustreben ist, daß beide Streifen im gleichen Maße von der Temperatur beeinflußt werden, denn in diesem Fall wird bei gleicher Zu- oder Abnahme der Widerstände infolge Temperaturänderungen keine Meßspannung entstehen. Will man aber eine Meßspannung U_M infolge einer Beanspruchung durch eine mechanische Spannung erhalten, muß man entweder nur einen Streifen dehnen bzw. stauchen lassen, oder man muß erreichen, daß der zweite entgegengesetzt beeinflußt wird. Man spricht im ersten Falle von einem passiven Kompensationsstreifen oder Blindstreifen und im zweiten Falle von einem aktiven Kompensationsstreifen (gemeint ist dabei Temperaturkompensation). Wie aus Bild 8 zu ersehen ist, ergeben sich folgende Zusammenhänge: kann man erreichen, daß beide Dehnungen ϵ_1 und ϵ_2 gleich groß sind aber entgegengesetztes Vorzeichen haben [$\Delta R_1(\epsilon_1) = -\Delta R_2(\epsilon_2)$], so ergibt sich die doppelte Empfindlichkeit, denn die Meßspannung wird

$$U_M = \frac{U_{sp}}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R}, \text{ wenn } R_1 = R_2 = R, \quad (4)$$

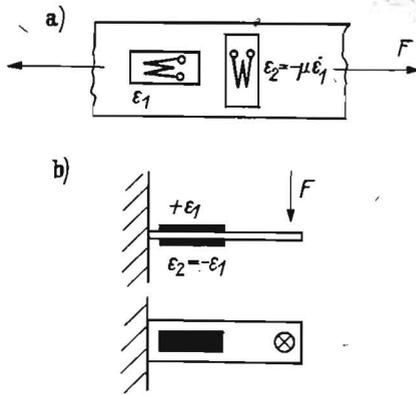


Bild 9. Beispiele für die Anordnung der aktiven Kompensationsstreifen; a) Ausnutzung der Querkontraktion, b) Ausnutzung entgegengesetzter Dehnungen infolge von Biegemomenten

also gleiche Meßstreifen verwendet werden. Ist $\Delta R_2 (\epsilon_2) = 0$, so bleibt es bei der oben genannten Empfindlichkeit (3). Beim Arbeiten mit Blindstreifen muß man den Streifen R_2 dann auf ein Konstruktionsteil mit gleichem Werkstoff kleben, das der gleichen Temperatur ausgesetzt ist, aber eben nicht beansprucht werden darf. Der Grund hierfür liegt darin, daß eine Widerstandsänderung infolge der Temperatur nicht so sehr aus der Temperaturabhängigkeit des Streifenwendelmateriale resultiert, sondern in stärkerem Maße durch die infolge der Wärmeausdehnung des Konstruktionsteils hervorgerufene Dehnungsänderung. Die Einhaltung der Forderung gleicher Temperaturen der Konstruktionsteile mit den messenden Streifen und Blindstreifen ist oft nicht ganz einfach. Deshalb benutzt man lieber die zweite Möglichkeit mit entgegengesetzter Beeinflussung, da es oft möglich ist, am gleichen Konstruktionsteil entgegengesetzte Dehnungen zu erhalten, die von der gleichen zu messenden Kraftkomponente erzeugt werden. Zwei Möglichkeiten zeigt Bild 9.

Im Bild 9a bewirkt die Querkontraktion eine Stauchung $\epsilon_2 = -\mu \epsilon_1$. Hierbei ergibt sich jedoch dann nicht die doppelte Empfindlichkeit, denn die Querkontraktionszahl μ ist gewöhnlich < 1 .

Im Bild 9b handelt es sich um Biegespannungen infolge des Moments, die an den Oberflächen bei homogenem Material und gleichmäßigem Querschnitt gleich groß aber entgegengesetzt gerichtet sind, so daß man eine doppelte Empfindlichkeit erhält. Die Ausnutzung der durch die gesuchten Komponenten erzeugten Biegespannungen ist auch deswegen oft recht günstig, weil die hervorgerufenen Dehnungen gewöhnlich wesentlich größer sind.

Man erkennt, daß ein Ausnutzen derartiger Effekte eine genaue Analyse der zu untersuchenden Spannungen und ihrer Richtungen voraussetzt. Die Beachtung der Richtungen ist erforderlich, da bei den Dehnungsmeßstreifen infolge der Anordnung der Drahtwendeln eine Empfindlichkeit nur in Längsrichtung der Drähte besteht. Durch das Umlegen an den Enden ergibt sich allerdings auch eine gewisse Querempfindlichkeit, die gegebenenfalls als Fehler beachtet werden muß. Bei Folie-meßstreifen ist dieser Einfluß geringer, da die Enden größeren Querschnitt besitzen, und damit der Anteil am Gesamtwiderstand verschwindend klein ist. Besonders zu beachten sind die genauen Spannungszustände am Meßort beim Wirken mehrerer Komponenten, wenn man nur eine beeinflussungsfrei (durch die anderen) messen will. So würde im Bild 9a eine Kraftkomponente in Querrichtung voll auf den Streifen in Querrichtung und über die Querkontraktion auch auf den Längstreifen wirken. Zu den Problemen beim Wirken mehrerer Komponenten soll später noch mehr gesagt werden, wenden wir uns zunächst der sogenannten Vollbrücke zu. Werden alle vier Widerstände

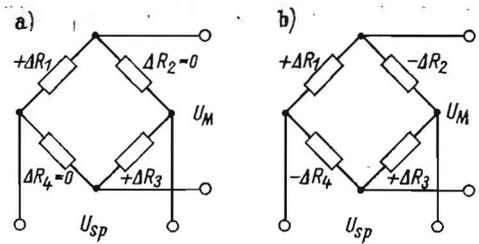


Bild 10. Möglichkeiten der Vollbrückenschaltung als Umformer für die Meßspannung;

$$\begin{aligned}
 \text{a) } R_1 - R_4 = R, \Delta R_1 = \Delta R_3 = \Delta R, U_M &= \frac{U_{SP}}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R} \\
 \text{b) } R_1 - R_4 = R, \Delta R_1 = \Delta R_3 = \Delta R, \Delta R_2 = \Delta R_4 &= -\Delta R, \\
 U_M &= U_{SP} \frac{\Delta R}{R}
 \end{aligned}$$

der Brücke durch geeignetes Zusammenschalten mit Meßstreifen verwirklicht, so ergibt sich eine Änderung der Meßspannung U_M , wenn man Widerstandsänderungen nach Bild 10 erreicht. Also beide Halbbrücken werden entgegengesetzt verstimmt, wie im Bild 9.

Hierbei erreicht man im 1. Fall (Bild 10a) unter der Voraussetzung $R_{10} = R_{30} = R$, $\Delta R_1 = \Delta R_3 = \Delta R$ die doppelte Empfindlichkeit wie bei der Beeinflussung eines Widerstands in der Brücke, und im 2. Fall (Bild 10b) $R_{10} = R_{20} = R_{30} = R_{40} = R$, $\Delta R_1 = \Delta R_3 = \Delta R$ und $\Delta R_2 = \Delta R_4 = -\Delta R$ die vierfache Empfindlichkeit. Hierbei würde dann ebenfalls eine Temperaturkompensation vorhanden sein, wenn alle vier Meßstreifen die gleichen $R = f(\vartheta)$ ergeben oder in jeder Halbbrücke die entgegengesetzt gleiche Verstimmung entsteht. Der höhere Aufwand (mehr Streifen) wird durch höhere Meßspannungen belohnt, und es bestehen mehr Möglichkeiten der Kompensation unerwünschter Beeinflussungen infolge der Temperatur oder anderer Komponenten. Es sei aber auch noch erwähnt, daß eine Zuleitung mehr benötigt wird. Weiterhin ist darauf aufmerksam zu machen, daß der Nullpunktgleich bei Differenzen zwischen R_1 bis R_4 , die durch die Fertigungstoleranzen usw. nicht vermeidbar sind, anders erfolgen muß. Die Anfangsmeßspannung U_{M0} wird durch eine Kompensationsspannung aufgehoben, die man einem Spannungsteiler in gewünschter Größe entnimmt. Bei industriell gefertigten Dehnungsmeßanlagen wird nach Umschalten auf Vollbrückenbetrieb hierzu die Regeleinrichtung für den R-Ableich und C-Ableich verwendet.

Dieses soll zunächst genügen zur Wirkungsweise der Geräte und Streifen bei der Dehnungsmeßstreifentechnik. Es wird empfohlen, Einzelheiten zur Handhabung den ausführlichen Bedienungsanleitungen der Dehnungsmeßanlagen und den Herstellerangaben zu den Meßstreifen sowie der Fachliteratur [8] [9] [10] zu entnehmen.

Literatur

- [5] OEMICHEN, M.: Maschinenuntersuchungen. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig 1959
- [6] ZSAAE, E.: Die dynamischen Eigenschaften des Schreibwerkes Typ K-4 zur Aufzeichnung von Drücken. Archiv. f. Landtechnik (1960) H. 3, S. 204 bis 212
- [7] PULZE, S.: Piacryl — ein Klebstoff für die Dehnmeßstreifen. Feingerätetechnik 14 (1965) H. 12, S. 564
- [8] GRAVE, H. F.: Elektrische Messung nichtelektrischer Größen. Akademische Verlagsgesellschaft Geest u. Potig K. G. Leipzig
- [9] KAUTSCH, R.: Elektrische Meßtechnik zur Messung nichtelektrischer Größen. VEB Verlag Technik Berlin 1966
- [10] ROHRBACH, CH.: Handbuch für elektrisches Messen mechanischer Größen. VDI-Verlag Düsseldorf

(Fortsetzung folgt)

A 7925/II