

---

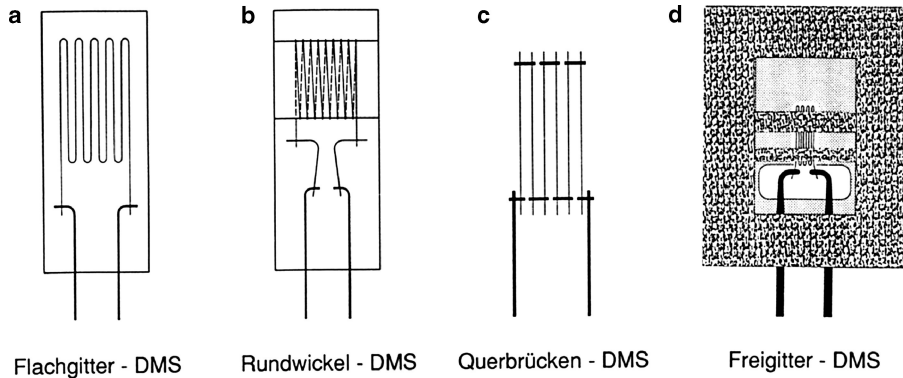
## 2.1 Messprinzip und Aufbau

### 2.1.1 Grundlagen

Dehnungsmessstreifen werden heute in vielen technischen Bereichen eingesetzt. Dabei dienen sie nicht nur dem Messen von Dehnungen, sondern sie eignen sich auch hervorragend zum Bau von Aufnehmern für mechanische Messgrößen. In diesen Messgrößenaufnehmern erfassen Dehnungsmessstreifen die Dehnungen, die die vom Aufnehmer zu messende mechanische Größen im Messkörper des Aufnehmers hervorruft. Auf diese Weise kann man mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen mittelbar z. B. Kräfte, Drücke oder Drehmomente messen. Ein verbreitetes Anwendungsgebiet für Dehnungsmessstreifen neben dem Aufnehmerbau ist die experimentelle Spannungsanalyse, bei der aus gemessenen Dehnungen die mechanischen Spannungen im Messobjekt ermittelt und dadurch Rückschlüsse auf dessen Beanspruchungen gezogen werden können. Immer jedoch nehmen Dehnungsmessstreifen mechanische Dehnungen auf und ändern ihren Widerstand entsprechend.

Bei der experimentellen Spannungsanalyse, deren Ziel die Beanspruchungsermittlung ist, müssen die mechanischen Spannungszustände aus den gemessenen Dehnungen berechnet werden. Der Zusammenhang zwischen Verformungen und Spannungen in einem Bauteil ist durch die für dessen Werkstoff und Beanspruchungszustand gültigen Stoffgesetze gegeben. Im elastischen Verformungsbereich wird das Hookesche Gesetz zugrunde gelegt, das jedoch im elastoplastischen Verformungsbereich nicht angewendet werden kann [2.1.1]. Bei über die Elastizitätsgrenze hinausgehenden Verformungen müssen Stoffgesetze angewendet werden, die die plastischen Verformungsanteile berücksichtigen [2.1.2]. Beim Bau von Messgrößenaufnehmern spielen diese Stoffgesetze formal keine Rolle, da Aufnehmer direkt in Einheiten der Messgröße kalibriert werden.

Die unbestrittenen Vorteile des Dehnungsmessstreifens liegen in der mit seiner Hilfe erfolgenden Umformung der Dehnung in ein elektrisches Signal. Die zu messende mecha-



**Abb. 2.1** Verschiedene Ausführungsformen von Draht-Dehnungsmessstreifen

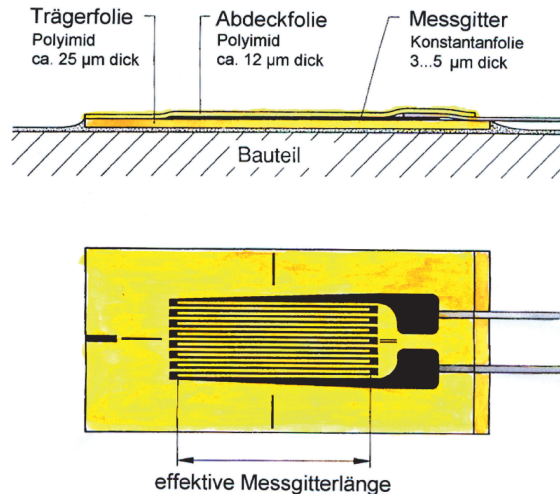
nische Größe Dehnung erzeugt im Dehnungsmessstreifen eine Widerstandsänderung, die die Ausgangsspannung der Wheatstoneschen Brückenschaltung ändert, deren Bestandteil der Dehnungsmessstreifen ist. Somit wird die Messgröße Dehnung in eine bequem weiter zu verarbeitende elektrische Größe umgeformt. Die Wheatstonesche Brückenschaltung bietet ausgezeichnete Möglichkeiten, bei dieser Umformung die Auswirkungen von unerwünschten Einflüssen, wie sie z. B. durch Temperaturänderungen eintreten können, weitgehend zu kompensieren. Besonders beim Bau von Messgrößenaufnehmern hat diese Kompensationstechnik einen hohen Entwicklungsstand erreicht. Da Messgrößenaufnehmer bei ihrer Herstellung direkt in der Einheit der zu messenden mechanischen Größe kalibriert werden, dienen die Dehnungsmessstreifen in diesen Aufnehmern nicht mehr zum unmittelbaren Messen von Dehnungen, sondern zum mittelbaren Messen der jeweiligen mechanischen Messgröße.

Das grundsätzliche Prinzip des Dehnungsmessstreifens besteht darin, dass die in der Oberfläche des Messobjekts auftretenden Dehnungsänderungen einem auf dieser Oberfläche befestigten elektrischen Leiter aufgezwungen werden, der seinen Widerstand entsprechend ändert. Aus der gemessenen Widerstandsänderung lässt sich die aufgetretene Dehnungsänderung mit hoher Präzision bestimmen. Die ersten aufklebbaren Dehnungsmessstreifen, die seit ca. 1940 in den USA industriell hergestellt wurden, bestanden aus einem mäanderförmig auf einen Papierträger geleimten dünnen Metalldraht. Dabei wurden unterschiedliche Herstellungsverfahren angewandt, die zu Dehnungsmessstreifen unterschiedlicher Gestalt führten.

Bei einer der Methoden wurden wie Abb. 2.1a verdeutlicht die Drähte mäanderförmig flach auf den Träger geklebt, so dass die aktiven Teile des Widerstandsdrahts parallel liegen und in Messrichtung ausgerichtet sind. Die auf diese Weise entstehenden *Flachgitterstreifen* besitzen ausgeprägte schlaufenförmige Umkehrstellen an den Gitterenden.

Eine andere Herstellungsmethode benutzt einen flachen Hilfsträger, um den der Widerstandsdraht wie in Abb. 2.1b gezeigt gewickelt wird und der dann mitsamt dem Draht auf

**Abb. 2.2** Prinzipieller Aufbau eines heute in großen Stückzahlen angewendeten Standard-Folien-Dehnungsmessstreifens mit metallischem Messgitter



den Träger geklebt wird. Bei diesen *Rundwickelstreifen* liegen die aktiven Messdrahtlängen nicht parallel und besitzen an ihren Enden keine ausgeprägten Umkehrstellen.

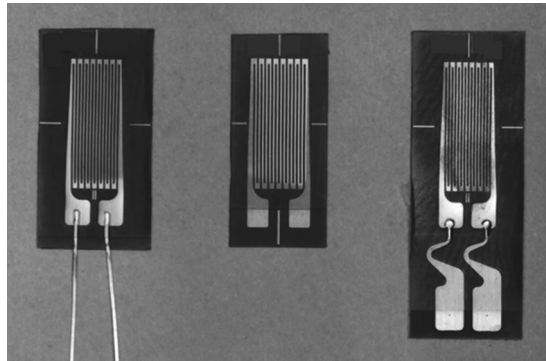
Gustafsson in Schweden stellte als erster Flachgitterstreifen in Form von *Querbrückenstreifen* her, bei denen wie in Abb. 2.1c gezeigt die Umkehrstellen des Messdrahts durch Querverbindungen aus dickerem Material ersetzt wurden. Derartige Querbrückenstreifen mit sehr geringer Querempfindlichkeit wurden bis 1994 unter dem Handelsnamen „Tepic“ von der Firma Huggenberger in Zürich hergestellt und vertrieben.

Eine ebenfalls heute noch speziell für Messungen bei hohen Temperaturen angewandte Form der Drahtstreifen sind *Freigitterstreifen*, die im Grunde genommen Flachgitterstreifen ohne Träger sind und mit Hilfe isolierender Befestigungsmittel wie z. B. keramischem Kitt auf dem Messobjekt befestigt werden. Abb. 2.1d gibt den Aufbau eines mit einem Hilfsträger versehenen Freigitterstreifens wieder. Der Hilfsträger dient lediglich als Installationshilfe und wird während des Befestigungsvorgangs entfernt.

Durch die Einführung der Folien-Dehnungsmessstreifen in den 1950er Jahren hat sich eine beachtliche Entwicklung der Dehnungsmessstreifen-Technologie vollzogen, die besonders in den letzten Jahren von den Erfordernissen der experimentellen Spannungsanalyse und des Aufnehmerbaus geprägt ist und heute für eine Vielzahl spezieller Anwendungsfälle Dehnungsmessstreifen mit angepassten Eigenschaften zur Verfügung stellt. Prinzipiell sind diese Folien-Dehnungsmessstreifen jedoch alle recht ähnlich aufgebaut und unterscheiden sich lediglich in Gitterform und -größe sowie in den für Träger und Messgitter verwendeten Werkstoffen.

Der grundsätzliche Aufbau eines Folien-Dehnungsmessstreifens wie er heute in riesigen Stückzahlen in vielen Anwendungsbereichen benutzt wird, sei anhand von Abb. 2.2 kurz erläutert. Auf einer isolierenden Trägerfolie aus Kunststoff, die ca. 25 µm dick ist, befindet sich die ca. 5 µm dicke metallische Messgitterfolie, die ihre Gestalt auf fotoche-

**Abb. 2.3** Beispiele für unterschiedliche Anschlussgestaltungen



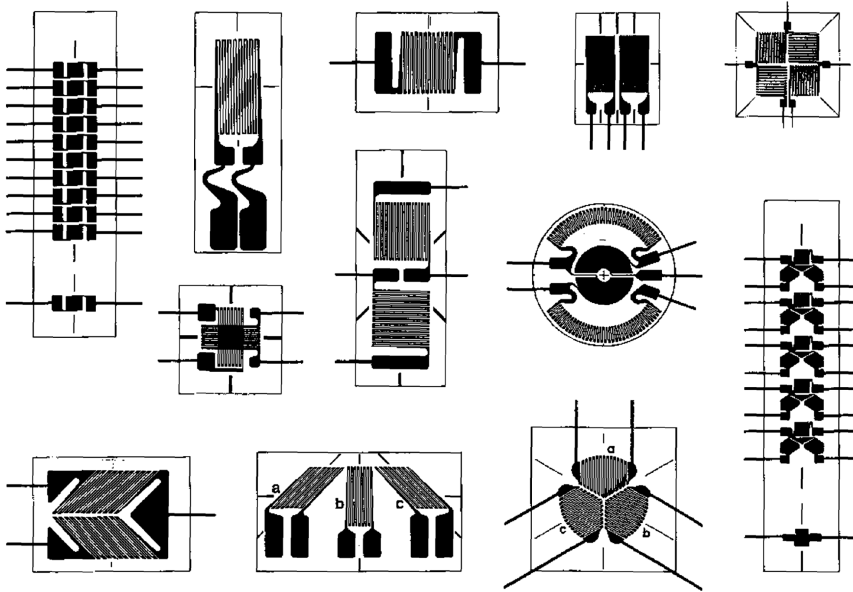
mischem Wege durch einen Ätzzvorgang erhält. Nach oben hin ist das Messgitter durch eine ca.  $12\text{ }\mu\text{m}$  dicke Abdeckschicht geschützt.

Mit einem Dehnungsmessstreifen soll die in Längsrichtung seines Messgitters auftretende mechanische Dehnung gemessen werden. Diese Dehnung erzeugt eine Widerstandsänderung im Messgitter des Dehnungsmessstreifens und somit eine messbare Verstimmung der elektrischen Brückenschaltung, in der sich der Dehnungsmessstreifen befindet. Widerstandsänderungen können jedoch im Dehnungsmessstreifen auch durch andere Einflüsse als die in Messrichtung des Dehnungsmessstreifens auftretende mechanische Dehnung verursacht werden. Neben dem eigentlichen Messwert „mechanische Dehnung in Messrichtung“ sind im Allgemeinen thermische Einflüsse und Kriecherscheinungen die wichtigsten Ursachen für auftretende Widerstandsänderungen. Wirkt hydrostatischer Druck auf einen installierten Dehnungsmessstreifen ein, so entsteht dadurch ebenfalls eine Widerstandsänderung. Der Querdehnungseinfluss, d. h. die durch quer zur Messrichtung wirksame Dehnungen entstehende Widerstandsänderung kann für Präzisionsmessungen von Bedeutung sein, ist für den Aufnehmerbau aufgrund der dabei erfolgenden Kalibriermaßnahmen aber bedeutungslos. Diese Störgrößen, die neben der zu messenden mechanischen Dehnung im Dehnungsmessstreifen unerwünschte Widerstandsänderungen erzeugen, werden in nachfolgenden Abschnitten ausführlich behandelt.

Der Dehnungsmessstreifen muss mindestens zwei Kontaktstellen besitzen, über die er z. B. durch Löten in die zum Messen erforderliche elektrische Brückenschaltung einbezogen werden kann. Diese Anschlussstellen können in unterschiedlicher Weise gestaltet sein, wie Abb. 2.3 in typischen Beispielen zeigt.

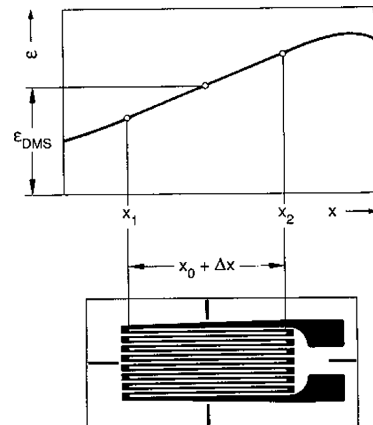
Durch das fotochemische Herstellungsverfahren lassen sich prinzipiell beliebige Messgitterkonfigurationen herstellen, wodurch sich die Dehnungsmessstreifen ideal an spezielle geometrische Anforderungen, wie sie z. B. beim Bau von Aufnehmern gefordert werden, anpassen lassen.

Die heute verfügbaren linearen Dehnungsmessstreifen mit metallischem Messgitter besitzen aktive Messgitterlängen von ca.  $0,2\text{ mm}$  bis  $150\text{ mm}$ . Ihre Nennwiderstände liegen, unabhängig von der Messgitterlänge, in der Regel zwischen  $100\text{ }\Omega$  und  $1000\text{ }\Omega$ . So-



**Abb. 2.4** Beispiele unterschiedlicher Gitterformen von Foliendehnungsmessstreifen

**Abb. 2.5** Integrierendes Erfassen des Dehnungsverlaufs über der aktiven Messgitterlänge des Dehnungsmessstreifens



wohl für die experimentelle Spannungsanalyse als auch für den Bau von Aufnehmern steht heute eine fast unüberschaubare Vielzahl unterschiedlicher Gitterkonfigurationen und Gitterkombinationen zu Mehrgitter-Dehnungsmessstreifen zur Auswahl. Abb. 2.4 zeigt beispielhaft eine kleine Auswahl unterschiedlicher Gitterkonfigurationen.

Dehnungsmessstreifen nehmen die in der Oberfläche des Messobjekts an der Installationsfläche auftretende mittlere Dehnung wie in (2.1) definiert auf. Treten Dehnungsgradienten längs der Messgitterachse des Dehnungsmessstreifens im Messobjekt auf, so nimmt der Dehnungsmessstreifen wie in Abb. 2.5 schematisch wiedergegeben als integrieren-

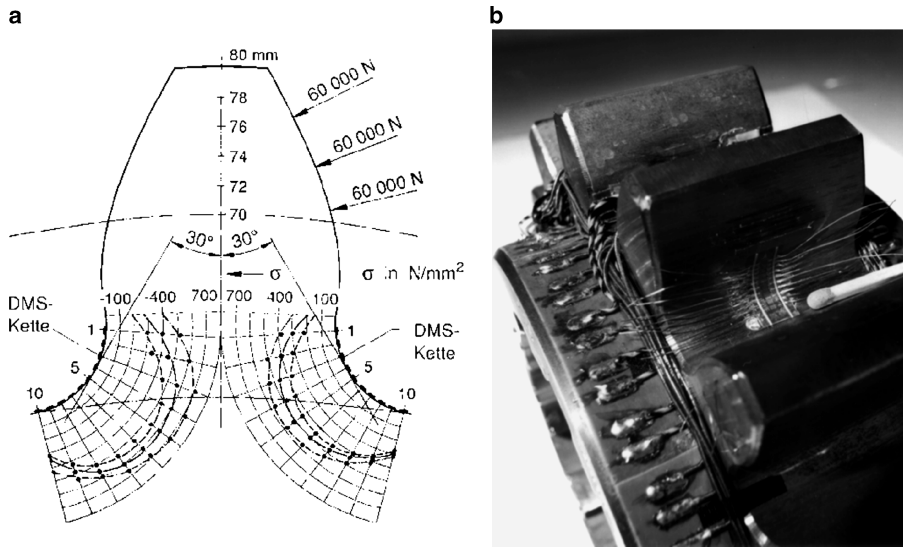
des Messelement den Mittelwert der im Bereich der aktiven Messgitterlänge auftretenden Dehnung auf, entsprechend dem Mittelwertsatz der Integralrechnung. In (2.1) ist  $\varepsilon_{\text{DMS}}$  der vom Dehnungsmessstreifen aufgenommene und in Widerstandsänderung umgeformte Dehnungsbetrag,  $x_1$  und  $x_2$  sind die die aktive Messgitterlänge in Messrichtung begrenzenden Längskoordinaten.

$$\varepsilon_{\text{DMS}} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\varepsilon(x)}{x_2 - x_1} dx \quad (2.1)$$

Somit ist der Dehnungsmessstreifen ein echter Dehnungsaufnehmer, im Gegensatz zu vielen anderen für die Dehnungsmessung eingesetzten Geräten, die lediglich eine Längsänderung messen und diese auf eine Ausgangsmesslänge beziehen. Im Hinblick auf (2.1) ist jedoch zu bemerken, dass eine derartige Integration entlang einer jeden Leiterbahn des Dehnungsmessstreifens erfolgt und der Ausdruck  $\varepsilon(x)/(x_2 - x_1)$  unter der Voraussetzung gilt, dass kein Dehnungsgradient quer zur Messrichtung vorhanden ist. Das Ergebnis  $\varepsilon_{\text{DMS}}$  ist somit die Summe der Integrationsergebnisse entlang jeder der vorhandenen Leiterbahnen. Diese Betrachtung gewinnt an Bedeutung, wenn die zu messende Längsdehnung einen Gradienten quer zur Messrichtung hat, wie das z. B. an den Rändern von Bohrungen oder Kerben der Fall ist. Dabei wirken auf die einzelnen Leiterbahnen unterschiedliche Dehnungen ein und das Gesamtergebnis  $\varepsilon_{\text{DMS}}$  ist der arithmetische Mittelwert aus den Integrationsergebnissen aller Leiterbahnen des Dehnungsmessstreifens.

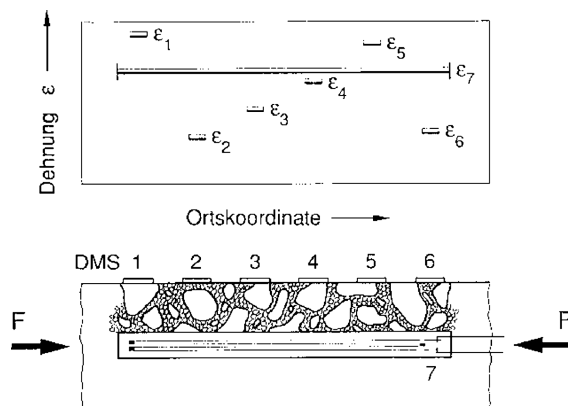
Die integrierende Eigenschaft ist ein maßgeblicher Gesichtspunkt für die Wahl der Messgitterlänge eines für eine bestimmte Messaufgabe vorgesehenen Dehnungsmessstreifens. Sind in der Oberfläche des Messobjekts bemerkenswerte Dehnungsgradienten zu erwarten, wie z. B. in Kerben oder an Querschnittsübergängen, dann sollte man kurze Messgitterlängen verwenden, um Messwerte als Integrationsergebnisse über kurze Strecken zu erhalten und um auf diese Weise den veränderlichen Dehnungsverlauf möglichst wirklichkeitsgetreu zu erfassen. Dafür stehen Messketten zur Verfügung, die z. B. auf einer Länge von 10 mm zehn Messgitter von jeweils 0,6 mm Messgitterlänge zusammenfassen. Der dabei von jedem Einzelgitter gelieferte Messwert entspricht dem Mittelwert der Dehnung über eine Strecke von 0,6 mm. Abb. 2.6 zeigt eine in einer Zahnfußausrundung eines geradverzahnten Stirnrads installierte Dehnungsmessstreifen-Messkette zur Erfassung der Dehnungsverteilung bei Belastung des Zahns in einer Versuchseinrichtung. Abb. 2.6a gibt die Anordnung der Messkette in einer Skizze wieder, Abb. 2.6b zeigt ein Foto der aufgeklebten, unverdrahteten und noch nicht abgedeckten Kette.

Es gibt jedoch auch Anwendungsfälle, in denen man die durch Inhomogenitäten im Messobjektwerkstoff entstehenden Ungleichmäßigkeiten in der Dehnungsverteilung als störend für die Messung empfindet und als Ergebnis einen möglichst repräsentativen Mittelwert anstrebt. Das kann z. B. bei Messungen an Beton der Fall sein, wo Einschlüsse aus Kies Dehnungsgradienten erzeugen oder an Metallen mit großen Kristallkörnern. In diesen Fällen wendet man bevorzugt Dehnungsmessstreifen mit großen Messgitterlängen an, die z. B. für Messungen an Beton mit Längen bis zu 150 mm zur Verfügung stehen [2.1.3].



**Abb. 2.6** In Längsrichtung der Dehnungsmessstreifen auftretender Dehnungsgradient: In einer Zahnfußausrundung eines Stirnrads installierte Dehnungsmessstreifen-Messkette mit extrem kurzen Messgitterlängen zum möglichst wirklichkeitsgetreuen Erfassen des Dehnungsgradienten  
**a** Skizze; **b** Foto der unverdrahteten Installation

**Abb. 2.7** Dehnungsmessergebnisse an einem inhomogenen Werkstoff (Beton) mit mehreren kurzen und mit einem langen Dehnungsmessstreifen

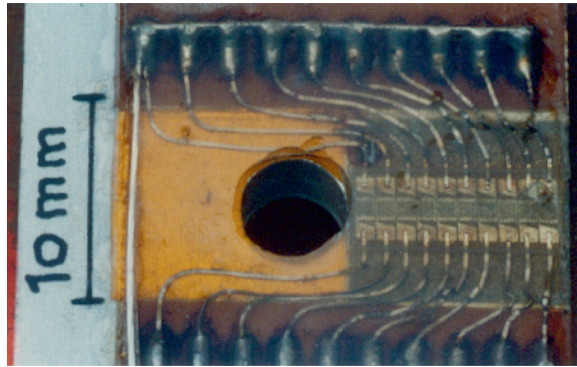


In Abb. 2.7 sind Messergebnisse mit mehreren kurzen und einem langen Dehnungsmessstreifen an Beton vergleichsweise nebeneinander dargestellt. Je nach Positionierung zeigen die kurzen Streifen unterschiedliche Dehnungen an, während der lange Streifen einen repräsentativen Mittelwert liefert.

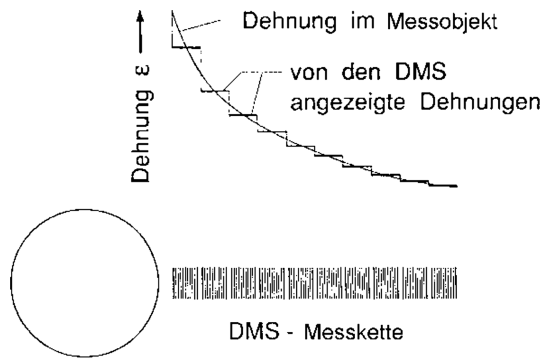
Für die Fälle, in denen die zu messende Längsdehnung einen signifikanten Gradienten in Querrichtung hat, setzt man zur möglichst lückenlosen Dehnungserfassung schmale Dehnungsmessstreifen dicht nebeneinander. Ein Beispiel dafür ist die Anwendung



**Abb. 2.8** Anordnung einer Messkette mit möglichst schmalen Messgittern zur Erfassung des quer zur Messrichtung vorhandenen Dehnungsgradienten im Bereich einer Bohrung in einem Zugstab



**Abb. 2.9** Schematische Darstellung des tatsächlichen Dehnungsverlaufs am Bohrungsrand und des von den einzelnen Dehnungsmessstreifen wiedergegebenen Mittelwerts über die jeweilige Messgitterbreite

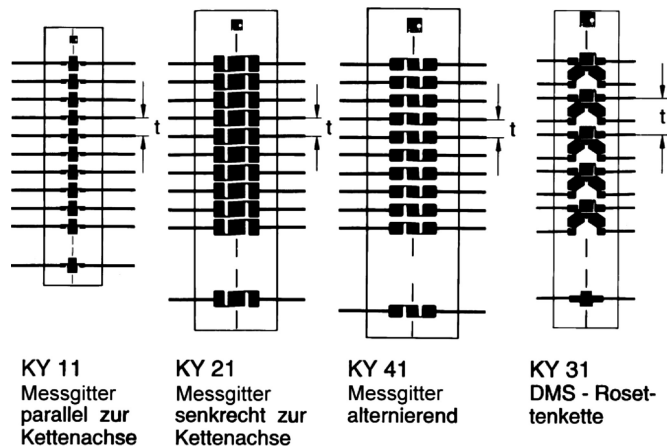


einer Dehnungsmessstreifen-Messkette, um die Dehnungsverteilung in der Umgebung einer Bohrung in einem Zugstab zu messen. Man weiß, dass durch die bohrungsbedingte Spannungskonzentration die Dehnung zum Bohrungsrand hin zunimmt, also ein Dehnungsgradient in radialer Richtung auftritt. Zur Erfassung dieses Dehnungsgradienten setzt man wie in Abb. 2.8 gezeigt eine Dehnungsmessstreifen-Messkette ein, deren Messgitterrichtungen quer zur Kettenachse orientiert sind und die den durch die Spannungskonzentration am Bohrungsrand beeinflussten Dehnungsverlauf erfassen.

Jeder Dehnungsmessstreifen liefert wie in Abb. 2.9 schematisch angedeutet den arithmetischen Mittelwert der Dehnungen in dem von seinem aktiven Messgitter abgedeckten Oberflächenbereich.

Werden Messungen an Objekten durchgeführt, in deren Oberfläche keine Dehnungsgradienten zu erwarten sind, dann ist die Messgitterlänge die optimale, die sich am bequemsten installieren lässt, d. h., die am besten unter den zum Andrücken beim Aufkleben benutzten Daumen des Installateurs passt. Das sind im Allgemeinen Messgitterlängen zwischen 5 mm und 10 mm. Auch beim Messen an schlechten Wärmeleitern wendet man aus Gründen der Wärmeenergiedissipation besser Dehnungsmessstreifen mit großen Gitterflächen an.



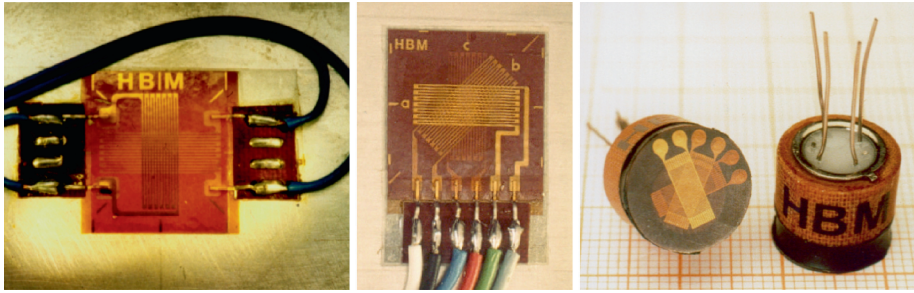


**Abb. 2.10** Beispiele für Dehnungsmessstreifen-Messketten zur Erfassung von Dehnungsgradienten in möglichst engen Bereichen

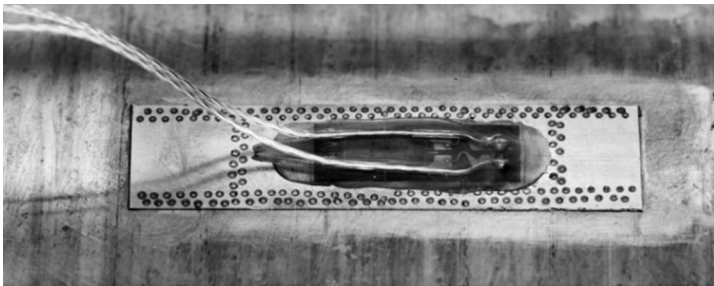
Wie aus den beispielhaft geschilderten Anwendungsfällen ersichtlich, werden von den Dehnungsmessstreifen-Herstellern unterschiedliche Typen von Dehnungsmessstreifen-Messketten angeboten. Die Parameter dieser Ketten sind neben dem verwendeten Träger- und Gitterwerkstoff die Orientierung der Messrichtungen der Einzelgitter sowie deren Abmessungen. Kleinste Messketten fassen zehn Messgitter auf einer Länge von 10 mm zusammen, wobei die Messrichtungen der Einzelgitter quer, längs, oder alternierend zur Achse der Kette ausgerichtet sein können. Die in Abb. 2.10 wiedergegebenen Beispiele zeigen von links aus gezählt eine Messkette mit parallel zur Achse ausgerichteten Messgittern, eine mit quer dazu orientierten Messrichtungen und eine Kette mit alternierenden Gittern. Das angegebene Maß  $t$  bezeichnet den Teilungsabstand der Messgitter.

Für Aufgaben der Spannungsanalyse werden auch *Rosettenketten* angeboten, die, wie in Abb. 2.10 ganz rechts gezeigt, kleine dicht nebeneinanderliegende, jeweils aus drei Einzelstreifen bestehende Rosetten auf einem Träger zusammenfassen. Der große Vorteil dieser Ketten liegt darin, dass sie sich durch den gemeinsamen Träger und die dadurch stabile gegenseitige Ausrichtung der Einzelgitter relativ einfach installieren lassen.

Für die Durchführung von Spannungsanalysen werden auch Dehnungsmessstreifen mit übereinanderliegenden Messgittern angeboten. Man möchte dabei mit den zwei oder drei gestapelten Gittern Dehnungen in unterschiedlichen Richtungen möglichst an der gleichen Stelle der Oberfläche des Messobjekts messen, um bei der Auswertung den Spannungszustand für die eng begrenzte Stelle zu erhalten. Bei Dehnungsmessstreifen-Rosetten mit nebeneinanderliegenden Gittern erfassen die drei Gitter Dehnungen an nebeneinanderliegenden Stellen, was beim Auftreten von Dehnungsgradienten zu Fehleinschätzungen bei der Spannungsermittlung führen kann. Diesen Fehler kann man bei übereinanderliegenden Messgittern stark verringern. Die gestapelten Einzelgitter sind dabei durch eine Folie



**Abb. 2.11** Beispiele für Dehnungsmessstreifen mit übereinanderliegenden Messgittern



**Abb. 2.12** Durch Punktschweißen auf einem Messobjekt befestigter anschweißbarer Dehnungsmessstreifen

mit guten dehnungsübertragenden und isolierenden Eigenschaften wie z. B. Phenolharz getrennt. Abb. 2.11 gibt Fotos derartiger Dehnungsmessstreifen wieder.

Es gibt spezielle Fälle, in denen Dehnungsmessstreifen wegen der Anwendungstemperaturen eigentlich mit heißhärtenden Klebern auf dem Messobjekt befestigt werden müssten, wegen der äußeren Gegebenheiten eine Heißhärtung aber nicht durchführbar ist (z. B. wenn das Messobjekt nicht den Klebevorschriften entsprechend erhitzt und bei konstanter Temperatur gehalten werden kann). Hier behilft man sich mit aufschweißbaren Dehnungsmessstreifen, die durch Punktschweißen am Messobjekt befestigt werden. Sie bestehen aus kleinen Blechträgern, auf die ein Dehnungsmessstreifen mit Kunststoffträger den Aushärtungsvorschriften entsprechend mit heißhärtendem Kleber befestigt ist.

Derartige anschweißbare Dehnungsmessstreifen werden in unterschiedlichen Ausführungsformen bezüglich der Abdeckung und der Anwendungstemperatur mit oder ohne bereits vorhandene Anschlusskabel von den Herstellern angeboten. Sie können allerdings nur auf Messobjekten befestigt werden, auf deren Werkstoff eine Punktschweißung ausführbar ist. Abb. 2.12 zeigt als Beispiel einen durch Punktschweißung auf dem Messobjekt befestigten Dehnungsmessstreifen, der aus einem durch Heißhärtung auf ein 0,1 mm dickes Trägerblech (Werkstoff X8Cr17) geklebten Folien-Streifen mit 6 mm Messgitterlänge und Polyimidträger besteht.

Dehnungsmessstreifen

Keil, S.

2017, XIV, 485 S. 329 Abb., 75 Abb. in Farbe.,

Hardcover

ISBN: 978-3-658-13611-6