

Eine Sensor-Erfindung von besonderer Bedeutung

Als Erfinder des DMS gelten Ed Simmons und Arthur Ruge, die ohne Kontakt zueinander unabhängig voneinander forschten. Beschrieben wurde das DMS-Prinzip erstmals vom Physiker William Thomson.

STEFAN KEIL *

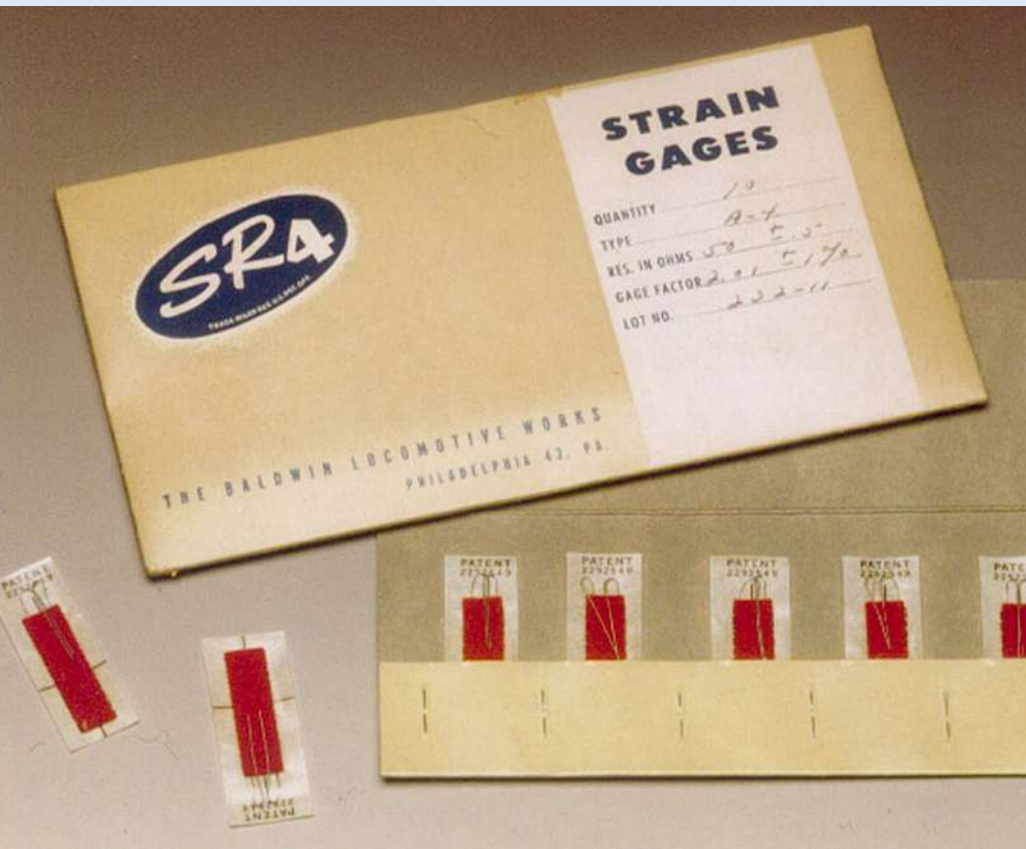


Bild 1: Eine der ersten Packungen mit SR4-Dehnungsmessstreifen von Baldwin Locomotive Works. S und R stehen für Simmons und Ruge und die Ziffer 4 im Markenzeichen für vier weitere beteiligte Mitarbeiter.

Als vor 50 Jahren die Fachzeitschrift ELEKTRONIKPRAXIS ins Leben gerufen wurde, war der Dehnungsmessstreifen (kurz DMS) schon fast 30 Jahre alt und hatte sich als Sensorelement für Verformungsmessungen in weiter Verbreitung auf vielen unterschiedlichen Anwendungsgebiete

etabliert. Heute werden DMS in riesigen Stückzahlen, von der Öffentlichkeit kaum wahrnehmbar, für Festigkeitsuntersuchungen und Sicherheitsnachweise an Bauteilen in den Versuchs- und Entwicklungsabteilungen der Hersteller von Automobilen, Flugzeugen, Schiffen, Schienenfahrzeugen, verfahrenstechnischer Anlagen u.a.m. genutzt. Die einfache Handhabung und schnelle Verfügbarkeit zuverlässiger Ergebnisse sind wesentliche Vorteile dieser Sensorelemente, die, obwohl schon ca. 80 Jahre alt, noch immer im technischen Alltag unentbehrlich



* Prof. Dr.-Ing. Stefan Keil
 ... gibt nach über 30 Jahren messtechnischer Praxis seine Erfahrungen in Vorlesungen und Seminaren an nächste Generationen weiter.

Bilder: Stefan Keil

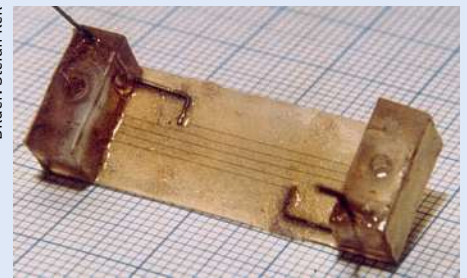


Bild 2: Ein Dehnungsmessstreifen in messbereiter Form mit abgenommenem Stabilisierungsbügel und Filzabdeckung (hergestellt nach einer Idee von Arthur Ruge).

sind. Aber auch beim Bau von Aufnehmern für Kräfte, Drücke, Drehmomente und zum Bau von wägetechnischen Anlagen haben die DMS wirtschaftlich große Bedeutung erreicht.

Methode & Technik waren noch nebensächlich

Wenn man sich auf das Entstehungsjahr 1936 einigt, wird der DMS im Jahr 2016 genau 80 Jahre alt. Damals führte Ed Simmons am Caltech (California Institute of Technology) in Pasadena/Kalifornien erste Kraftmessungen mit Widerstandsdrähten aus Konstantan durch, die er auf einer Trägerfolie befestigte und diese dann auf das Messobjekt klebte. Simmons war damals als technische Hilfskraft in ein Forschungsprojekt eingebunden, dessen Ergebnisse im Vordergrund vor der Methode standen, die zum Ergebnis geführt hat. Deshalb wurde die von Simmons angewandte Messmethode auch nicht 1936 zum Patent angemeldet.

Simmons bemerkte später, dass das Messen eines Widerstands in einem Leitungsdraht aus seiner Sicht nicht patentwürdig sei. Somit kam es erst nach der 1941 erfolgten Veröffentlichung der erzielten Messergebnisse zum Bekanntwerden der angewandten Messmethode. Verbreitet wird heute beson-



Bild 3: Stefan Keil (rechts) im Gespräch mit Ed Simmons (1988), dessen 1940 angemeldete Erfindung 1942 patentiert wurde.

ders in den USA das Jahr 1938 als Geburtsjahr des DMS angesehen, als Prof. Ruge zusammen mit seinem Assistenten Hanns Maier am MIT (Massachusetts Institute of Technology) erfolgreich Dehnungsmessungen an Modellen von Wassertanks mit Widerstandsdrähten durchführte.

Da sowohl Simmons als auch Ruge voneinander unabhängig an weit auseinanderliegenden Orten (ohne voneinander Kenntnis zu haben) den frei installierbaren DMS erstmalig angewendet hatten, kann man heute in der Rückschau beiden den Ruhm des Erfinders zuerkennen. Beide nutzten bei der elektrischen Verschaltung der zum Messen verwendeten Widerstandsdrähte die nach Wheatstone benannte Brückenschaltung, die auch heute noch als Grundschaltung für das Messen mit DMS zum Einsatz kommt.

Eine Erfindung ohne kommerzielle Bedeutung

Ruge erahnte zur Zeit seiner Erfindung weitgehende messtechnische Anwendungsmöglichkeiten und meldete seine Erfindung den Regeln entsprechend dem Patent-Komitee des MIT. Dessen Antwort, die man heute rückblickend als bemerkenswerten Irrtum bezeichnen muss, lautete in freier Übersetzung: „... das Komitee sieht in der Erfindung keine kommerzielle Bedeutung und überlässt die Nutzung voll dem Erfin-

der.“ Damit war für Ruge der Weg frei für die Verwertung.

Gemeinsam mit seinem Kollegen de Forest suchte Ruge nach einem Investor zur Gründung einer DMS-Produktion. Nach ersten Schwierigkeiten („Wir sind im Lokomotiven-Geschäft und wollen uns nicht mit Briefmarken befassen“), begann in Zusammenarbeit



Bild 4: Arthur C. Ruge am Modell eines Wassertanks auf einem Rütteltisch mit den ersten Dehnungsmessstreifen (Untersuchung des Verhaltens bei Erdbeben).

mit Baldwin Lokomotive Works die erste industrielle Produktion. Vorher erfolgte durch einen Anwalt die patentrechtliche Klärung für Simmons und Ruge, als deren Ergebnis das Markenzeichen SR-4 für das neue Produkt hervorging. Hergestellt wurden Draht-DMS mit Trägern aus Zellulose. Als Widerstandsdraht verwendete man bevorzugt Cu-Ni-Legierungen (Konstantan) in Flachgitter- und Rundwickeltechnik. In Modifikationen der Legierungszusammensetzung versuchte man einerseits die Dauerfestigkeit und andererseits die Verarbeitbarkeit der Drähte zu verbessern. Für Streifen mit erhöhter Schwingfestigkeit setzte sich Isoelastic durch, hatte aber Nachteile bezüglich Temperaturstabilität und Kriechen. Wider anfängliche Erwartungen war die Nachfrage nach den neuen Sensorelementen riesig. Der für ein Jahr angelegte Vorrat war binnen weniger Wochen ausverkauft.

Zum Verkaufserfolg trug gewiss der sich für die USA ankündigende Eintritt in den Zweiten Weltkrieg bei. Besonders die Flugzeugindustrie stellte an die DMS und deren Hersteller ständig neue Anforderungen bezüglich spezieller Eigenschaften. Entwicklungsziele waren u.a. Minimierung der Temperaturempfindlichkeit und des Kriecheinflusses, Erweiterung des Anwendungstemperaturbereichs und besondere Resistenz gegenüber äußeren Einflüssen. Der Zweite Weltkrieg und die inneren Verhältnisse in Deutschland und Japan waren sicherlich auch Grund dafür, dass in diesen beiden Staaten die Erfindung des DMS bis zum Kriegsende unbekannt blieb. In Deutschland behalf man sich mit den von Theis bei AEG entwickelten Graphitschicht-DMS, die erfolgreich für Schwingungsmessungen an Luftschrauben (Propellern) eingesetzt wurden, jedoch Nachteile bezüglich Nullsignal-Stabilität aufwiesen. Die ersten Draht-DMS kamen aus den Niederlanden nach Deutschland.

Der Nutzen des neuen Messelements wird erkannt

Karl Hottinger, der während des Krieges als Mess-Ingenieur bei der Luftwaffen-Erprobungsstelle in Rechlin (Mecklenburg-Vorpommern) beschäftigt war, führte dort Verformungsmessungen mit induktiven Aufnehmern durch, für die er mit seinen Kollegen Trägerfrequenz-Messverstärker entwickelte. Nach dem Krieg führte er 1952 mit diesen Messgeräten an Brücken der Deutschen Bundesbahn Verformungsmessungen mit DMS von Philips und induktiven Wegaufnehmern durch, die als Beweise für die Tauglichkeit der DMS gewertet wurden.

Zur gleichen Zeit erwarb die Firma Carl Schenck in Darmstadt von der Baldwin Lima Hamilton Inc. aus den USA die Lizenz zur Herstellung von Draht-DMS und gründete mit Karl Hottinger die Hottinger Messtechnik GmbH, die 1955 die ersten DMS aus deutscher Produktion auf den Markt brachte und im gleichen Jahr einen mit diesen DMS ausgerüsteten Kraftaufnehmer vorstellte. Aber auch in vielen anderen Ländern erkannte man die Nützlichkeit des neuen Messelements und arbeitete an dessen Entwicklung.

Der Schwede Gustafsson verminderte die Querempfindlichkeit durch seine 1946 vorgestellten Querbrücken-DMS, die als weitere grundlegende Verbesserung Träger aus Kunststoff anstelle der bis dahin verwendeten Zellulose hatten. Damit war zwar der Nachteil der nicht mehr nutzbaren physikalischen Kleber verbunden, konnte aber durch Entwicklung geeigneter chemisch aushärtender Kleber umgangen werden.

Der bemerkenswerteste Entwicklungsschritt erfolgte 1952 in Großbritannien durch Peter Jackson mit der Einführung des photochemischen Ätzverfahrens zur Herstellung von Folien-DMS, die sich in nahezu allen denkbaren Formen gestalten ließen. Damit wurde das Anwendungsspektrum weiter vergrößert. Speziell gestaltete DMS entstanden für das Ermitteln von Eigen- und Wärmespannungen. Auch für Anwendungen im Hochtemperaturbereich werden Spezial-

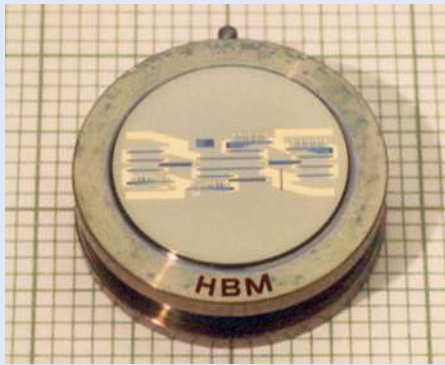


Bild 5: Membran eines Miniatur-Druckaufnehmers mit aufgedampfter DMS-Schaltung in Dünnschichttechnik.

DMS entwickelt, heute stehen Draht-DMS für Temperaturen bis ca. 950 °C zur Verfügung. Für die Herstellung von Aufnehmern entstand die Laminiertechnik, die erlaubt, vollständige aus mehreren Widerständen bestehende Brückenschaltungen einschließlich der Abgleichelemente in einem Arbeitsgang zu installieren. Erwähnenswert ist hier auch die entstandene Dünnschichttechnik, mit deren Hilfe die Bestandteile eines DMS auf einen Federkörper aufgedampft werden und somit eine Miniaturisierung der Aufnehmer erlauben.

Der althergebrachte DMS bleibt unverzichtbar

Eng verbunden mit der Verfügbarkeit der ersten DMS war die Notwendigkeit des Abbaus der Hemmschwelle bei den meisten der potenziellen Anwender. Nur durch gezielte Aufklärung war es möglich, die an die bisher verfügbaren Messmittel gewöhnten Techniker mit den neuen elektrischen Geräten vertraut zu machen. Hier haben in Deutschland die Hersteller Erstaunliches geleistet. Heute sind Dehnungsmessstreifen zu unentbehrlichen Hilfsmitteln in kaum noch überschaubaren Anwendungsbereichen geworden. Trotz bemerkenswerter Schritte bei der Entwicklung alternativer Messverfahren ist heute noch nicht abzusehen, wie lange der DMS seine dominierende Stellung als Sensor beim Messen mechanischer Größen noch halten wird.

Auf der Suche nach Methoden und Sensoren, die den DMS ersetzen und aus seinen Anwendungsgebieten verdrängen könnten, war man bis heute noch nicht umfassend erfolgreich. Die mit Laserstrahlen arbeitende ESPI (Elektrische Speckle-Pattern-Interferometrie) ist zwar ausgereift und kann erfolgreich angewendet werden, ist aber sehr aufwendig und bringt nur in einigen speziellen

Randgebieten Vorteile gegenüber dem DMS. Optische DMS, die auf der Faser-Bragg-Technik basieren, sind heute für praktische Anwendungen verfügbar und für Einsätze in starken elektromagnetischen Feldern und im Ex-Schutz-Bereich dem herkömmlichen DMS überlegen. Erfolgreiche Anwendungen erfolgten z.B. bei Bauwerküberwachungen und für Kraftermittlungen an Radsätzen der Deutschen Bundesbahn. Neben optischen Messverfahren haben sich speziell für Messungen bei hohen Temperaturen kapazitive Dehnungsmessstreifen etabliert. Magnetoelektrische und piezoelektrische Messstreifen sind entwickelt und versuchen sich im Markt zu bewähren. Bei allen positiven Eigenschaften steht fast immer die Frage der Wirtschaftlichkeit im Vordergrund, und da besitzt der althergebrachte DMS in Kombination mit moderner Signalverarbeitungstechnik zurzeit nur schwer überbietbare Vorteile.

Heutige Entwicklungsarbeiten befassen sich mit der Optimierung von Fertigungsverfahren und der Anwendung neuer Werkstoffe für Messgitter und Träger. Man experimentiert z.B. mit auf einen Träger aufgesputterten granularen hochohmigen Widerstandsschichten auf Basis von Nickel-Kohlenstoff und Schichten aus Pt-SiO₂. In Versuchsstadien werden hohe Widerstände bis zu 50 kΩ und k-Faktoren bis zu 20 erreicht. Das herkömmliche Ätzen der Widerstands-Folien wird vermieden, die Strukturierung erfolgt mittels Ultrakurzzeitlaser. Miniaturisierte Aufnehmerkörper stellt man aus Zirkon-Oxyd her, auf die direkt ohne Isolierschicht aufgesputtert wird.

Schaut man auf die bisherige Entwicklung zurück, so ist festzustellen, dass die wesentlichsten Fortschritte für das Messen mit DMS auf dem Gebiet der Signalverarbeitung erzielt worden sind. Das recht simple physikalische Wirkungsprinzip des DMS hat sich seit nunmehr 80 Jahren nicht verändert.

Heute besteht das wesentliche Ziel, den nach wie vor ein analoges Ausgangssignal liefernden DMS in das moderne Umfeld der digitalen Datenverarbeitung einzubeziehen. Durch enorme Fortschritte auf dem Gebiet der digitalen Signalkonditionierung sind heute Messaufgaben lösbar, besonders im Hinblick auf zeitlich schnell veränderliche Messgrößen, die der analogen Gerätetechnik verschlossen blieben. Mit Hilfe rechnergesteuerter Geräteeinheiten sind heute sehr schnelle vielkanalige synchrone online-Messungen an dynamisch belasteten Bauteilen problemlos geworden. // KU

imc Test & Measurement



Bild 6: Karl Hottinger 1950 zur Zeit der Firmengründung Hottinger Messtechnik GmbH.