

# Erfahrungen beim Messen von Ringspannungsänderungen mit Dehnungsmeßstreifen an einem Formstein-Hochsilo

Dipl.-Ing. F. Zschaage, KDT, Institut für Mechanisierung Potsdam-Bornim der AdL der DDR

## 1. Aufgabe

Zur Ermittlung der Beanspruchungen eines Hochsilobaukörpers aus Formsteinen durch das Silogut waren u. a. die Spannungsänderungen in den Ringen während und einige Zeit nach der Füllperiode, d. h. über einen längeren Zeitraum, zu messen.<sup>1</sup> Dazu waren Meßwertgeber auszuwählen und auf ihre Eignung zu überprüfen. In Meßwertgebern standen zur Verfügung:

- Setzdehnungsmesser (Eigenbau)
- Saitendehnungsmesser
- Dehnungsmeßstreifen (DMS)

## 2. Auswahl des Meßwertgebers

Bei der Auswahl war zu berücksichtigen, daß die Meßzeitspanne mehrere Monate betrug, daß keine Möglichkeit einer Nullpunktkontrolle bestand, daß viele Meßstellen an die eng an der Silowand anliegenden Spannringe in Höhen bis zu 17 m anzubringen waren und daß die Meßstellen der Witterung ausgesetzt sind. Erleichternd für diese schwierigen Bedingungen war, daß nur eine Ablesung je Tag notwendig war.

Von den Kosten her sind die DMS am geeignetsten (Tafel 1). Über die langzeitige Nullpunkt Konstanz ist nichts bekannt. Sie wird abhängen von dem Kleber und der Abdeckmasse. DMS werden hauptsächlich für Kurzzeitmessungen eingesetzt (Größenordnung Minuten), wobei die Nullpunkt Konstanz bereits von der Kürze der Meßzeit her gegeben ist. Bei den Setzdehnungsmessern ist eine Fernablesung nur bedingt möglich. Der Einsatz von DMS gegenüber Setzdehnungsmessern bringt folgende Vorteile:

- kleinerer Skalenwert; dadurch ist Erfassen kleiner Änderungen der Ringspannungen in möglich
- Fernablesung bereitet keine Schwierigkeiten und erspart das Besteigen von Gerüsten
- Wartungsarbeiten nur bei Ausfall eines DMS
- weniger anfällig gegen Berühren
- dynamische Messungen sind möglich

Nachteilig ist:

- empfindlicher gegen einseitige Erwärmung, deshalb sind Messungen nur nach Sonnenuntergang, vor Sonnenaufgang oder bei bedecktem Himmel möglich
- Wärmespannungen in den Siloringen werden als Ringspannungen angezeigt
- Verfälschung des Meßwerts durch sich bildende Nebenzustände bzw. durch Änderung der Übergangswiderstände.

Erfahrungen beim Einsatz von DMS für Langzeitmessungen lagen nicht vor; die Eignung der zur Verfügung stehenden Kleber, Abdeckmassen, DMS und des Meßgeräts war zu überprüfen.

Dazu wurde in einem Rahmen ein Stab eingespannt, dessen Zugbelastung verändert werden konnte. Zum Messen der auf den Stab ausgeübten Zugkraft diente ein optischer

Kraftmeßbügel als Vergleichsnormale. Am Stab waren angebracht: 2 Folien-DMS-Stellen in Vollbrückenschaltung, 1 Paar Eigenbau-Setzdehnungsmesser und 3 Saitendehnungsmesser verschiedener Basislänge. Die DMS waren mit dem Einkomponentenschnellkleber „Fimofix“ aufgeklebt. Eine DMS-Meßstelle wurde mit dem 2-Komponentenkleber „Epsol EP 11“, die andere mit Elektroisierlack gegen Feuchtigkeit abgedeckt (Tafel 2).

Als Anzeigergerät für die DMS diente der Manuelle Kompensator „MK“, der sich durch eine hohe Empfindlichkeit und eine sehr gute Nullpunkt Konstanz auszeichnet. In einem weiteren Vorversuch wurden Messungen an einem anderen Zugstab vorgenommen, an dem 4 DMS-Meßstellen und 1 Paar Eigenbau-Setzdehnungsmesser angebracht waren. Auch hier diente ein optischer Kraftmeßbügel als Vergleichsnormale. Die DMS waren wie zuvor mit „Fimofix“ aufgeklebt und mit „Epsol“ EP 11 abgedeckt (Tafel 3). Der Rahmen mit dem Stab und den daran befindlichen Meßstellen wurde der Witterung ausgesetzt. Die Messungen erstreckten sich jeweils über eine Zeitspanne von 3 Wochen und wurden bei ver-

Tafel 1. Gegenüberstellung der 3 Meßwertgeber

Meßwertgeber		Setzdehnungsm.	Saitendehnungsm.	DMS
Anzeigebereich <sup>1</sup>	kp/cm <sup>2</sup>	10 000 <sup>2</sup> oder 2 400 <sup>3</sup>	1 600 <sup>4</sup> bis 2 500	5 000
Skalenwert <sup>1</sup>	kp/cm <sup>2</sup>	100 <sup>2</sup> oder 20 <sup>3</sup>	3.2 bis 5 <sup>4</sup>	0,77 <sup>5</sup>
Nullpunkt Konstanz		nicht bekannt		
Zu erwartende Nullpunkt Konstanz	—	konstanter Nullpunkt		abhängig von Abdeckung
Fernablesung	—	nur bedingt möglich mit Fernrohr möglich		möglich
Befestigung an den Spannringen mit	—		Klemm- vorrichtung	Klemm- vorrichtung
empfindlich gegen Berühren	—	ja	ja	nein
empfindlich gegen Feuchtigkeit	—	nein	nein	ja; abhängig von Abdeckung
Zeit für Anbringen von 60 Meßstellen	Tage	2	4	15 <sup>6</sup>
Kosten je Meßstelle bei 60 Meßst.	M	≈ 200 <sup>2</sup> ≈ 500 <sup>3</sup>	≈ 1 200	70
Zu erwartende max. Spannungen	kp/cm <sup>2</sup>	1 000		

<sup>1</sup> bei einem E-Modul von  $2 \cdot 10^6$  kp/cm<sup>2</sup>

<sup>2</sup> bei Meßuhren als Anzeigerinstrument (SkW 10 µm)

<sup>3</sup> bei Feinzeiger als Anzeigerinstrument (SkW 2 µm)

<sup>4</sup> je nach Meßwertgeber

<sup>5</sup> bei Vollbrücke und Verwendung eines Manuellen Kompensators

<sup>6</sup> bei Verwendung eines Schnellklebers zum Aufkleben der DMS

Tafel 2. Vergleich von Dehnungsmeßeinrichtungen und Abdeckungen bei DMS (max. Temperaturdifferenz 11,2 grad; max. Spannung 1290 kp/cm<sup>2</sup>)

	Setzdehnungsmesser	DMS Elektroisolierer	DMS 2-Komp.-Kleber	Saitendehnungsmesser mm Basislänge	25	50	100
Anzahl d. Messungen		20			10		
mittl. Fehler kp/cm <sup>2</sup>	-52	-20	-1	+22	-132	-33	
Streuung kp/cm <sup>2</sup>	±18	±56	±10	±18	±28	±25	

<sup>1</sup> Diese Messungen wurden in Zusammenarbeit mit der Bauakademie der DDR durchgeführt und dienen dem Ziel, die bisher gültigen Berechnungsvorschriften den tatsächlichen Beanspruchungen der Silobaukörper anzupassen, eine beanspruchungsgerechte Dimensionierung und damit eine bessere Ausnutzung der Baustoffe zu erreichen. Über die Ergebnisse dieser Messungen wird an einer anderen Stelle berichtet.

Tafel 3. Vergleich gleichartiger DMS-Meßstellen (max. Temperaturdifferenz 16,9 grd., max. Spannung 901 kp/cm<sup>2</sup>)

Anzahl d. Messungen	Setzdehnungsmesser	DMS-Meßstellen (2-Komponenten-Kleber)			
		1	2	3	4
19					
mittl. Fehler kp/cm <sup>2</sup>	-28	-22	-27	-24	-2
Streuung kp/cm <sup>2</sup>	±26	±28	±20	±19	±25
Nullpunkt-Wanderung in 14 Tagen kp/cm <sup>2</sup>	+10	-12	0	-2	+3

schiedener Witterung (von Sonne und trocken bis bedeckt und Regen) durchgeführt. Darüber hinaus wurde ein Präzisionsstufenschalter als Meßstellenumschalter erprobt.

Aus den Ergebnissen der Vergleichsmessungen (Tafel 2 und 3) lassen sich folgende Schlußfolgerungen ableiten:

- Der Fehler des Setzdehnungsmessers wird überwiegend vom Fehler der Meßuhren bestimmt. Er bleibt innerhalb der Fehlergrenze von  $\pm 100$  kp/cm<sup>2</sup>. Setzdehnungsmesser wären bezüglich des Fehlers für die beabsichtigte Messung geeignet.
- Bei den Saitendehnungsmessern war aufgrund ihres Meßprinzips der schwingenden Saite ein geringerer mittlerer Fehler und vor allem eine geringe Streuung zu erwarten. Wegen der unterschiedlich großen mittleren Fehler, vor allem aber wegen der hohen Preise von rd. 1200 M je Meßstelle und der Beschaffung der Meßstellen nur durch Import schied der Saitendehnungsmesser für den geplanten späteren Einsatz aus.
- Von den DMS-Meßstellen zeigen die mit dem Zweikomponentenkleber abgedeckten Meßstellen die besten Ergebnisse. Der größere Fehler und die größere Streuung bei der lackisolierten Meßstelle ist durch die ungenügende Isolationsfähigkeit des Lackes gegenüber Feuchtigkeit bedingt (Tafel 2).
- Das ursprünglich befürchtete „Kriechen“ der DMS war nicht zu beobachten, ein Zusammenhang zwischen Fehler der Einzelmessung und Temperatur ebenfalls nicht. Daraus folgt, daß sowohl der Kleber „Fimofix“ als auch die Folien-DMS selbst für Langzeitmessungen geeignet sind.
- Zwischen den Messungen über den Meßstellen-Umschalter des Manuellen Kompensators und denen über den Präzisionsstufenschalter ergaben sich geringfügige Abweichungen von durchschnittlich  $\pm 6$  kp/cm<sup>2</sup>. Der Präzisionsstufenschalter ist somit als Meßstellenumschalter geeignet. Sein Preis beträgt nur einen Bruchteil der industriell gefertigten Meßstellenumschalter für solche Zwecke, deren sonstige Vorteile, wie eingebaute Abgleichrichtungen, für den speziellen Fall der beabsichtigten Dehnungsmessungen nicht benötigt werden. Die Abweichungen von  $\pm 6$  kp/cm<sup>2</sup> sind bedingt durch variable Übergangswiderstände.
- Eine ausreichende Abdeckung der DMS gegen Feuchtigkeitseinwirkung ist nur mit dem Zweikomponentenkleber möglich. Eine ungenügende Abdeckung führt bei Feuchtigkeitseinwirkung zur unkontrollierten Änderung der Übergangswiderstände, die sich u. a. in Nullpunktverschiebungen bemerkbar machen.
- Bei einem Nennwiderstand des DMS von 120  $\Omega$  und einem k-Faktor von 2, einem E-Modul des Zugstabes von  $2 \times 10^6$  kp/cm<sup>2</sup> täuscht (in erster Näherung) ein Parallelschalten eines Widerstandes von 24 M $\Omega$  (!) zum DMS eine Spannungsänderung von 5 kp/cm<sup>2</sup> vor.

Zum Vergleich sei angeführt, daß Kunstharzpreßmassen, wie z. B. Phenolharz mit anorganischem Füllstoff, einen spezifischen Widerstand von 10 M $\Omega$  mm aufweisen.

Die Änderung der Übergangswiderstände beeinflussen den Meßwert nicht nur, wenn sie an den DMS selbst, sondern

auch an eventuell notwendigen Steckverbindungen und an den Meßstellenumschaltern auftreten. Je nachdem, an welcher Stelle der DMS-Brücke sich ein Übergangswiderstand ändert oder bildet, verändert sich entweder der Nullpunkt oder die Empfindlichkeit oder beides.

Es muß deshalb gerade bei Langzeitmessungen auf sorgfältige Isolierung geachtet und das Entstehen von solchen Übergangswiderständen bzw. Übergangswiderstandsänderungen, die eine Widerstandsänderung der DMS bewirken, so weit wie möglich ausgeschaltet werden.

Wenn sich zwischen den Messungen über den Meßstellenumschalter im Manuellen Kompensator und denen über den Präzisionsstufenschalter Anzeigeunterschiede von 6 kp/cm<sup>2</sup> ergeben haben, so läßt das auf Übergangswiderstandsänderungen von 20 M $\Omega$  schließen.

### 3. Praxiseinsatz der DMS

Wegen der günstigen Ergebnisse der Vergleichsmessungen wurden sowohl 60 Meßstellen an Siloringen für Dehnungsmessungen als auch 18 Meßstellen an Kraftmeßbringen installiert. Während die Meßstellen an den Siloringen nur ungenügend gegen Witterungseinflüsse abgedeckt werden konnten, befanden sich die Meßstellen an den Kraftmeßbringen unter je einem unten offenen Kasten. Lediglich an diesen Meßstellen konnte der Nullpunkt und auch der Skalenwert kontrolliert werden. Die einzige Kontrollmöglichkeit bei den anderen Meßstellen bestand nur im Vergleichen der gemessenen Ringspannungsänderung mit der ungefähr bekannten Tendenz der Ringspannungsänderung. Gemessen wurde nur in den Sommermonaten. Bei den 60 Meßstellen waren während der Meßzeit keine Ausfälle und auch keine Abweichungen zwischen den tatsächlichen und vorhersehbaren Ringspannungsänderungen zu beachten.

In der Zeit von Ende September bis Anfang Mai waren 8 Meßstellen ausgefallen, davon 2 durch mechanische Einwirkungen. Die Ursache des Ausfalls konnte nicht geklärt werden, da beim Entfernen der Deckschicht stets die DMS beschädigt wurden. Die Verdrahtung der DMS wurde zur Vermeidung von Stellen, an denen sich Übergangswiderstände bilden können, ohne Lötstützpunkte ausgeführt. Somit war eine Überprüfung der einzelnen DMS nicht möglich. Von den verbleibenden 52 Meßstellen zeigten wiederum 8 starke Änderungen des Nullpunktes.

Konkretere Aussagen lassen dagegen die Meßstellen an den Kraftmeßbringen zu, da bei ihnen Veränderungen des Nullpunktes kontrolliert werden konnten (Tafel 4).

Die Skalenwertänderungen zwischen den beiden Justierungen im Mai des einen und Mai des darauffolgenden Jahres waren nicht größer als 2 Prozent der Nennlast außer bei einer Meßstelle. Bei ihr betrug sie 3,5 Prozent.

### 4. Ergebnisse

Die bisherige Praxiserprobung zeigt, daß es möglich ist, über mehrere Monate Langzeitmessungen mit DMS durchzuführen, wobei die DMS mit dem Einkomponentenschnellkleber „Fimofix“ aufgeklebt und mit dem Zweikomponentenkleber „Epsol“ EP 11 abgedeckt sind, unter folgenden Voraussetzungen:

Tafel 4. Nullpunktänderung bei Meßstellen an den Kraftmeßbringen

Nullpunktänderung in % d. Nennlast	Anzahl d. Meßstellen	Beobachtungszeitraum	Temperatur		Anzahl d. Beobachtungen
			max. °C	min. °C	
0,4—2	13	Mitte Mai bis Mitte Sept.	30	15	11
2—3	4				
3—5	1				
0—5	8	Mitte Sept. bis Anfang Mai	nicht beobachtet		2
5—10	7				
10—20	3				

- hohe Nullpunkt Konstanz des Meßgeräts
- Vermeidung von Lötstütz- und anderen nicht unbedingt notwendigen Punkten, zwischen denen sich Übergangswiderstände bilden bzw. ändern können
- Möglichkeit der Nullpunkt Kontrolle der Meßstellen oder mindestens ungefähre Kenntnis der Änderungen der Meßwerte
- Schutz gegen Witterungseinflüsse, insbesondere gegen Regen
- Messung möglichst in den Morgenstunden oder abends, d. h. nicht bei praller Sonne

Wie Tafel 4 zeigt, wirken sich extreme Witterungsverhältnisse, wie sie während der Winterperiode auftreten, stark auf die Nullpunktswanderungen aus. Deshalb ist eine Messung während der Wintermonate mit größeren Fehlern als während der Sommermonate verbunden. In den Sommermonaten muß man bei etwa 80 bis 90 Prozent Meßstellen mit einem Fehler von  $\pm 5$  Prozent ( $\approx 3$  Prozent Nullpunktwanderung + 2 Prozent Skalenwertänderung) rechnen. Ebenso muß man mit unvorhersehbaren Übergangswiderständen bzw. -widerstandsänderungen und damit Ausfall der Meßstelle rechnen. Man sollte deshalb einige Meßstellen mehr als notwendig vorsehen. Insbesondere nach anhaltendem Regen sind sprunghafte Veränderungen, soweit sie nicht durch

die Natur des Meßvorgangs bedingt sind, stets ein Zeichen von Widerstandsänderungen. Da bei den Meßstellen auf Zwischenstecker nicht verzichtet werden konnte, die ebenfalls der Witterung ausgesetzt waren, wird ein Teil, möglicherweise sogar der größere Teil der Nullpunktveränderungen durch sie bewirkt. Die Ergebnisse sind auch auf die sorgfältige Ausführung der Meßstellen zurückzuführen. Die Qualität der Meßstellen hängt u. a. von den Erfahrungen beim Umgang mit DMS ab. Deshalb sollten, bevor DMS für Langzeitmessungen benutzt werden, mehrjährige Erfahrungen vorliegen und evtl. in einem Laborversuch die Qualität der Meßstellen getestet werden.

## 5. Zusammenfassung

An einem Formstein-Silobaukörper waren die Spannungen von Siloringen über mehrere Monate hinweg zu messen. Von den zur Verfügung stehenden Eigenbau-Setzdehnungsmessern, Saitendeckungsmessern und Dehnungsmessstreifen (DMS), wurden in Vorversuchen als günstigste Variante die DMS ausgewählt. Die anschließenden Messungen ergaben, daß Langzeitmessungen mittels DMS möglich sind, jedoch muß mit Nullpunktänderungen gerechnet werden. Daher muß eine Kontrollmöglichkeit gegeben sein. Weitere Bedingungen und zu erwartende Fehler werden genannt. A 9432

# Bestimmung des Meßfehlers bei statischen Wanddruckmessungen an Gärfutterbehältern mit Halmgutfüllung

Dipl.-Ing. F. Zschaage, KDT, Institut für Mechanisierung Potsdam-Bornim der AdL der DDR

## 1. Aufgabe

Umfangreiche Messungen der Beanspruchungen von Hochsilos durch das Siliergut führten dazu, daß verbesserte Lastannahmen vorgeschlagen werden konnten */1/*. Aus ihnen resultieren geringere Beanspruchungen, als die bisher zur Berechnung verwendeten Lastannahmen nach DIN 1055 ergaben. Unbefriedigend sind die bisherigen Erkenntnisse über den Meßfehler bei den Wanddruckmessungen */1/ /2/*.

Die Hauptbeanspruchungen eines Silobaukörpers werden vom Druck des Silierguts auf seine Wandung hervorgerufen. Deshalb ist der Wanddruck die wichtigste Meßgröße. Fehler in der Wanddruckmessung bedingen Fehler in den aus den Meßergebnissen abgeleiteten Lastannahmen und damit Fehler in der Dimensionierung.

Zur Wanddruckmessung werden Eigenbau-Meßwertgeber verwendet, deren Mehrzahl im Prinzip aus einer in einer Öffnung der Silowand eingelassenen kreisförmigen Platte besteht. Die durch das Siliergut auf diese Druckmeßplatte (DMP) ausgeübte Druckkraft befindet sich mit einer von außen auf die DMP wirkenden Stützkraft im Gleichgewicht. Abhängig von der Erzeugung der Stützkraft bewegt sich die DMP mit zunehmendem Silowanddruck mehr oder weniger vom Siliergut weg, sofern nicht eine komplizierte Kompensationseinrichtung eine weglose Druckmessung ermöglicht. Bei der wegbehafteten Messung wird ein geringerer Druck als tatsächlich vorhanden angezeigt */2/*. Bisher wurde der Meßfehler nur für eine spezielle Meßeinrichtung an einem Versuchsbehälter bestimmt. Die Ergebnisse sind nicht auf Meßeinrichtungen mit DMP übertragbar */3/*.

Für Meßeinrichtungen mit DMP ist daher eine Methode zur Bestimmung der Meßfehler zu entwickeln.

## 2. Möglichkeiten zur Bestimmung des Meßfehlers

### 2.1. Vorbemerkungen

Bekanntlich wird der Fehler eines Meßgeräts oder einer -einrichtung durch Vergleichen mit einem Normal oder einem geeichten Meßgerät bestimmt. Bei Meßeinrichtungen für den Wanddruck in Gärfuttersilos sind diese Möglichkeiten nicht gegeben, da der Druck sich hier nicht wie z. B. bei einer Flüssigkeit nach allen Seiten gleichmäßig fortpflanzt. Diese Voraussetzung muß erfüllt sein, wenn eine Wanddruckmeßeinrichtung mit unbekanntem Fehler mit einer neben ihr eingebauten geeichten Meßeinrichtung verglichen werden soll. Daher sind zur Meßfehlerbestimmung nur mittelbare Verfahren anwendbar.

### 2.2. Rechnerische Bestimmung des Meßfehlers

Bei der rechnerischen Bestimmung des Meßfehlers muß erstens ein Problem der Plattentheorie gelöst werden. Das Siliergut als nahezu unbegrenzte, von einem (konstant verteilt angenommenen) Druck beaufschlagte „Platte“ mit großer Dicke liegt auf der Behälterwand und der in ihr eingelassenen DMP auf. Während normalerweise Plattengleichungen dazu dienen, entweder Beanspruchungen in der Platte oder ihre Durchbiegung zu berechnen, würde in diesem Fall nach der Stützkraft  $P$  an der DMP und deren Veränderung nach Verschieben der DMP um den Weg  $s$  zu fragen sein. Die Veränderung der Stützkraft wird durch Normal- und Schubspannungen im Siliergut bei Verschiebung um den Weg  $s$  bewirkt.

Ein derartiger Fall ist bisher nicht gelöst und wegen der Kompliziertheit nur nach starken Vereinfachungen lösbar. Die Vereinfachungen würden u. a. die Randbedingungen