

Die Konstruktion von Membran-Druckaufnehmern

Die folgenden Darstellungen sind lediglich als generelle Richtlinien zum Konstruktionsprinzip von Membran-Druckaufnehmern gedacht. Hinsichtlich der gewünschten Leistungsmerkmale eines solchen Aufnehmers wird der wirkliche Konstruktions- und Entwicklungsprozess immer auf einen bestmöglichen Kompromiss in Bezug auf Empfindlichkeit, Linearität und Frequenzverhalten hinauslaufen, wobei letztendlich die bestimmenden Parameter Membrandurchmesser und Membrandicke sind.

Die angeführten Berechnungsformeln beruhen dabei auf einer oder mehreren der folgenden Annahmen:

- Gleichmäßige Membrandicke
- Kleine Membranauslenkungen
- Unendlich steife Membraneinspannung

- Vollkommen elastisches Verhalten
- Vernachlässigbare Versteifungs- und Masseffekte durch den DMS auf der Membran.

Die Genauigkeit der Berechnungsformeln ergibt sich somit unmittelbar daraus, wie gut der Aufnehmer diese Bedingungen befriedigt. Deswegen sollten sie nur im Stadium der ersten Konstruktionschritte zur Bestimmung der ungefähren Aufnehmerproportionen herangezogen werden.

Empfindlichkeit

Die Dehnungsverteilung in einer unendlich steif eingespannten Membran unter gleichmäßigem Druck ist in Abb. 1 dargestellt.

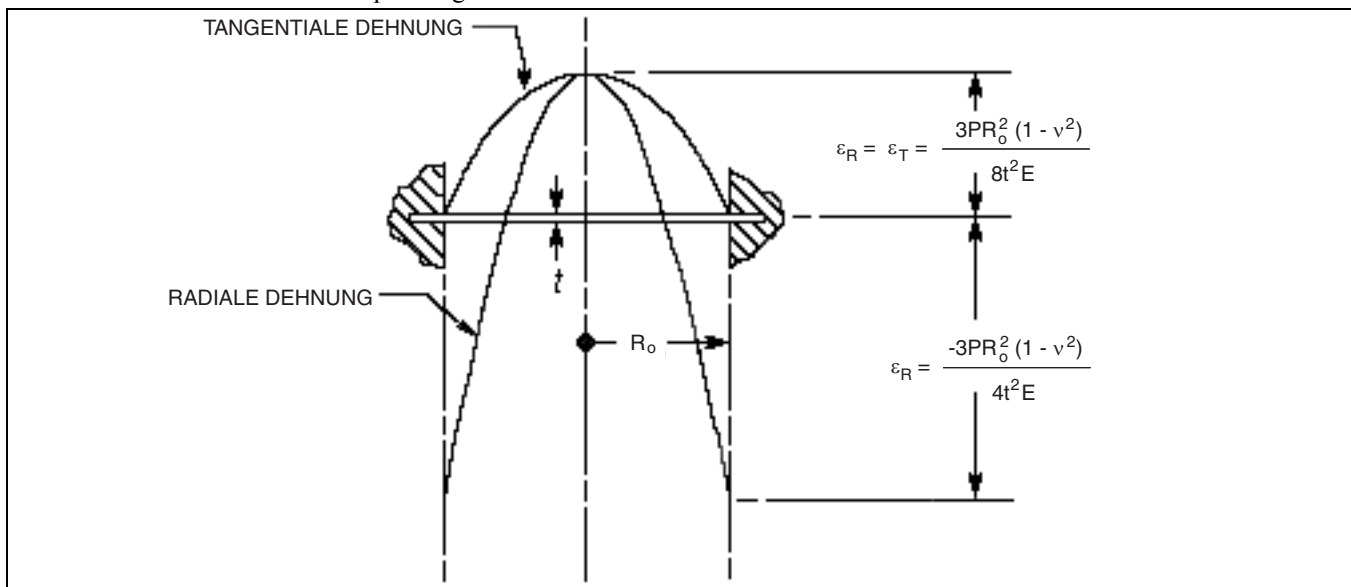


Abb. 1 - Dehnungsverteilung in einer eingespannten Membran

Die radialen und tangentialen Dehnungen sind im Zentrum der Membran identisch und können ausgedrückt werden zu:

$$\varepsilon_{R_c} = \varepsilon_{T_c} = \frac{3PR_0^2(1-v^2)}{8t^2E} \quad (1)$$

Es sind:

ε_{R_c}	= Radialdehnung im Membranzentrum	($\mu\text{m}/\text{m}$)
ε_{T_c}	= Tangentialdehnung im Membranzentrum	($\mu\text{m}/\text{m}$)
P	= Druck	(Pa)
R_0	= Membranradius	(mm)
t	= Membrandicke	(mm)
v	= Poisson'sche Zahl	dimensionslos
E	= Elastizitätsmodul	(Pa)

Die Konstruktion von Membran-Druckaufnehmern

Die Radialdehnung nimmt mit steigendem Radius rasch ab, wird negativ und nimmt an der Membranaußenkante einen Wert an, der zweimal dem der Dehnung im Zentrum entspricht. Die Tangentialdehnung nimmt vom Zentrum zum Rand hin ab und wird an der Membranperipherie zu Null. Also:

$$\varepsilon_{R_o} = -\frac{3PR_o^2(1-\nu^2)}{4t^2E} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{T_o} = 0 \quad (3)$$

Abb. 2 zeigt, dass die gezeigte DMS-Rosette der Geometrie "JB" unserer Vishay Micro-Measurements so gestaltet ist, dass sie hinsichtlich der Gitterrichtungen der geschilderten Dehnungsverteilung voll Rechnung trägt. Da die Tangentialdehnung vom Zentrum nach außen nur ein Drittel so stark abnimmt wie die Radialdehnung, sind die Gitterelemente im Zentrum tangential angeordnet. In analoger Weise sind die Gitterelemente am Membranrand radial angeordnet, da dort die hohen Radialdehnungen vorliegen. Unter Ausnutzung der unterschiedlichen Vorzeichen von Radial- und Tangentialdehnung und indem man die jeweiligen Gitterelemente in symmetrische Paare aufteilt, kann man in der in Abb. 1 gezeigten Weise eine DMS-Membran-Rosette als Vollbrücke gestalten. Zu einer konstruktiv optimalen Gestaltung dieser Rosette gehört es schließlich, dass die Lötflächen der Rosette, wie in Abb. 2 sichtbar, in einen Bereich niedriger Dehnung gelegt werden.

Nimmt man die Mittelwerte der Dehnung unter jedem Gitterelement (unter der Annahme eines K-Faktors von 2,0), und mittelt man die Ausgangssignale aller Gitterelemente, dann kann das Gesamtausgangssignal (e_o) der Membranrosette in guter Näherung folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$e_o = 0.82 \frac{PR_o^2(1-\nu^2)}{t^2E} \times 10^3, \text{ mV/V} \quad (4)$$

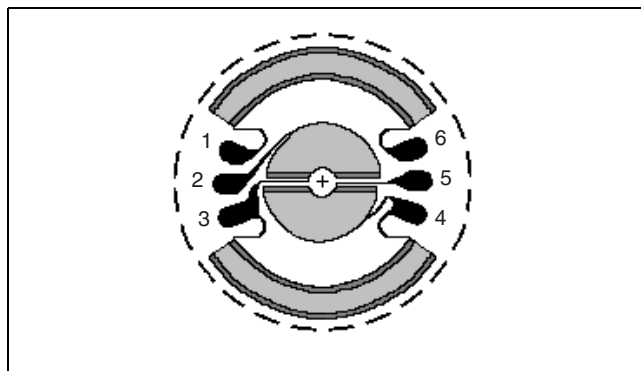


Abb. 2 - Vishay Micro-Measurements Membranrosette für Membran-Druckaufnehmer, Ausführung "JB"

Linearität

Die bis jetzt angeführten Gleichungen für die Membrandehnung und das Ausgangssignal deuten an, dass das Ausgangssignal dem zu messenden Druck proportional ist. Eine wirkliche Linearität ist allerdings nur für unendlich kleine Membranauslenkungen gegeben. Bei Membranauslenkungen endlicher Größe ist dem Druckaufnehmer eine Nichtlinearität eigen, die mit steigender Auslenkung größer wird. Als Faustregel kann gesagt werden, dass die Auslenkung im Membranzentrum nicht größer sein soll als die Membrandicke. Soll die Nichtlinearität eine Größenordnung von 0,3% nicht überschreiten, darf die Membranauslenkung im Zentrum ein Viertel der Membrandicke nicht überschreiten.

Die folgende Formel für die Membranauslenkung basiert auf der Theorie kleiner Auslenkungen:

$$Y_c = \frac{3PR_o^4(1-\nu^2)}{16t^3E} \quad (5)$$

Wobei: Y_c = Membranauslenkung im Zentrum (mm).

Dynamisches Verhalten

Für die getreue Wiedergabe dynamischer Drücke ist es notwendig, dass die Eigenfrequenz der Membran beträchtlich höher als die Druckfrequenz liegt. In hohem Maße vom Dämpfungsverhalten der DMS/Membran-Einheit und des Druckmediums abhängig, sollte die Eigenfrequenz mindestens drei- bis fünfmal höher sein als die höchste auftretende Druckfrequenz. Eine eingehendere Behandlung des dynamischen Verhaltens von Membran-Druckaufnehmern würde bei weitem über den Rahmen der vorliegenden Erörterungen hinausgehen. Sollen Druckaufnehmer jedoch hohen Druckfrequenzen ausgesetzt werden, oder liegen scharfe Druckwellenfronten mit hochfrequenten Anteilen vor, muss das dynamische Verhalten der Aufnehmer in Bezug auf Amplitude und Phasenverschiebung sorgfältigst in Betracht gezogen werden.

Nur für Referenzzwecke und unter Zugrundelegung der weiter oben angeführten Voraussetzungen hinsichtlich der Mechanik der Membran, kann die ungedämpfte Eigenfrequenz einer unendlich steif eingespannten Membran wie folgt ausgedrückt werden:

$$f_n = \frac{0.469t}{R_o^2} \sqrt{\frac{gE}{\gamma(1-\nu^2)}}, \text{ Hz} \quad (6)$$

Es sind:

g = Erdbeschleunigung

γ = spez. Gewicht des Membranwerkstoffs

$\gamma/g = \rho$ = Dichte des Membranwerkstoffs

Die Konstruktion von Membran-Druckaufnehmern

Konstruktive Ausführung

Um maximale Genauigkeit bei minimierter Hysterese zu erreichen, ist es allgemeine Praxis, den Aufnehmer so auszuführen, dass Membran und Aufnehmerkörper aus einem Stück sind (siehe Abb. 3).

Bei der Herstellung des Aufnehmers ist es weder notwendig noch letztlich wünschenswert, den Übergang vom Aufnehmerkörper zur Membran als scharfe Ecke auszubilden. Andererseits ist ein kehlig ausgeführter Übergang mit einem bestimmten Radius eben eines der Merkmale, durch das sich eine praktisch sinnvolle Konstruktion vom idealisierten Konzept und den oben angeführten Annahmen und Bedingungen sowie von den durch die Gleichungen definierten Zuständen unterscheidet. Wegen dieser und anderer praxisbedingter Abweichungen vom Ideal wird der Aufnehmer natürlich auch kein wirklich ideales Verhalten zeigen können, sodass eine Leistungsoptimierung für einen gegebenen Membran-Druckaufnehmer ganz offenbar empirisch und experimentell geschehen muss.

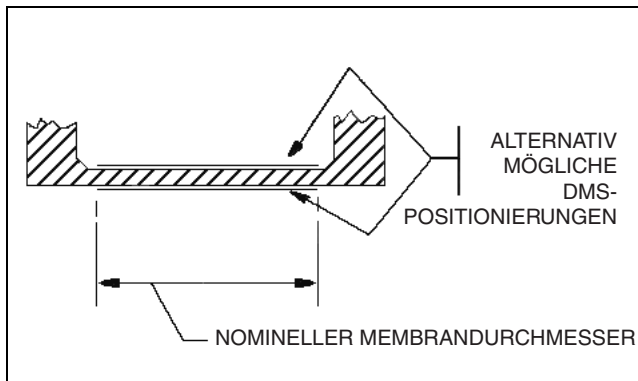


Abb. 3 - Typische Membranausführung für einen Druckaufnehmer

Brückenverdrahtung

Wie aus Abb. 4 ersichtlich, ist die Membranrosette der Geometrie "JB" so gestaltet, dass zwei Ecken der Wheatstone-Brückenschaltung offen sind. Damit sind Möglichkeiten zur Korrektur der Temperaturdrift und des nachfolgenden widerstandsmäßigen Nullabgleichs gegeben.

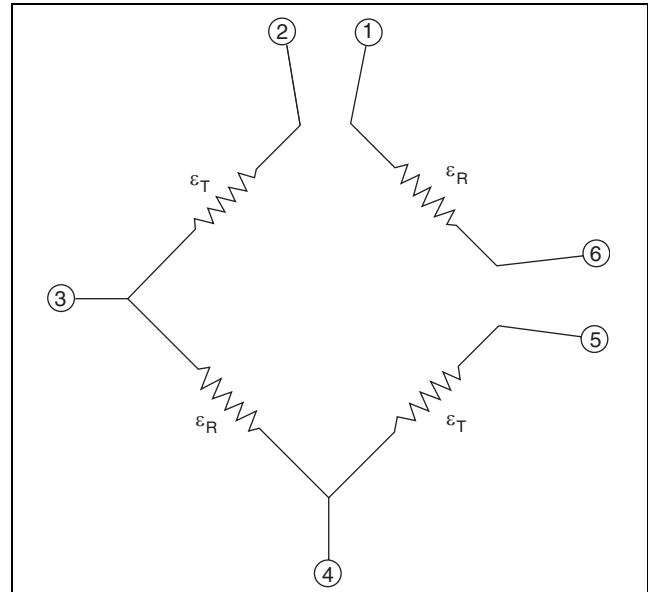


Abb. 4 - Brückenschaltung der Vishay Micro-Measurements Membranrosette der Geometrie "JB"

Hinweis: Die Membranrosette, auf die in dieser TechNote Bezug genommen wird und andere Membranrosetten sind im großen DMS Data Book der Vishay Micro-Measurements sowie im Katalog TC-116 für Meßwertaufnehmer-DMS aufgeführt und ausführlich beschrieben.

Membrandurchmesser >12,5mm (0,49") erfordern die Anwendung von sogenannten "Linear"-Membranrosetten, welche im Katalog TC-116 für Meßwertaufnehmer-DMS beschrieben sind.

Die Konstruktion von Membran-Druckaufnehmern

Numerisches Beispiel

In metrischen (SI)- und U.S.-Customary-Einheiten

Angenommen, ein Druckaufnehmer mit Stahlmembran soll für einen Druckbereich von 6,89MPa (1000psi) mit einem Membrandurchmesser von 17,02mm (0,670") so ausgelegt werden, dass die Empfindlichkeit (e_o) bei Vollausschlag 2mV/V beträgt. Die folgenden Parameter sind zu berechnen:

- Membrandicke
- Membranauslenkung im Zentrum
- Eigenfrequenz
- Ungefährer maximaler Dehnungspegel

Konstanten*)

U.S. Customary

$$P = 1000 \text{ lbs/in}^2$$

$$e_o = 2 \text{ mV/V}$$

$$R_o = 0.335 \text{ in}$$

$$E = 30 \times 10^6 \text{ psi}$$

$$\gamma = 0.283 \text{ lbs/in}^3$$

$$g = 386.4 \text{ in/sec}^2$$

Metrisch (SI)

$$P = 6.89 \text{ MPa}$$

$$e_o = 2 \text{ mV/V}$$

$$R_o = 8.51 \text{ mm}$$

$$E = 207 \text{ GPa}$$

$$\rho = 7.83 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3 = \gamma/g$$

a) Zur Berechnung der Membrandicke wird Gleichung (4) nach t aufgelöst:

$$t = \sqrt{\frac{0.82 P R_o^2 (1 - \nu^2) \times 10^3}{e_o E}}$$

$$t = \sqrt{\frac{0.82 \times 1000 \times (0.335)^2 [1 - (0.285)^2] \times 10^3}{2 \times 30 \times 10^6}}$$

$$t = 0.0375 \text{ in}$$

$$t = \sqrt{\frac{0.82 \times 6.89 \times (8.51)^2 [1 - (0.285)^2] \times 10^9}{2 \times 207 \times 10^9}}$$

$$t = 0.9529 \text{ mm}$$

b) Zur Berechnung der Membranauslenkung im Zentrum wird Gleichung (5) herangezogen:

$$Y_c = \frac{3 P R_o^4 (1 - \nu^2)}{16 t^3 E}$$

$$Y_c = \frac{3 \times 1000 \times (0.335)^4 [1 - (0.285)^2]}{16 \times (0.0375)^3 \times 30 \times 10^6}$$

$$Y_c = 0.0014 \text{ in}$$

$$Y_c = \frac{3 \times 6.89 \times (8.51)^4 [1 - (0.285)^2] \times 10^6}{16 \times (0.9529)^3 \times 207 \times 10^9}$$

$$Y_c = 0.0348 \text{ mm}$$

c) Die Eigenfrequenz wird mit Gleichung (6) berechnet:

$$f_n = \frac{0.469 t}{R_o^2} \sqrt{\frac{g E}{\gamma (1 - \nu^2)}}$$

$$f_n = \frac{0.469 \times 0.0375}{(0.335)^2} \sqrt{\frac{386.4 \times 30 \times 10^6}{0.283 [1 - (0.285)^2]}}$$

$$f_n = 33 \text{ 090 Hz}$$

$$f_n = \frac{0.469 \times 0.9529}{(8.51)^2} \sqrt{\frac{207 \times 10^9}{7.83 \times 10^{-3} [1 - (0.285)^2]}}$$

$$f_n = 33 \text{ 102 Hz}$$

d) Der maximale Dehnungspegel wird mit Gleichung (2) ermittelt:

$$\epsilon_{R_o} = -\frac{3 P R_o^2 (1 - \nu^2)}{4 t^2 E}$$

$$\epsilon_{R_o} = -\frac{3 \times 1000 \times (0.335)^2 [1 - (0.285)^2]}{4 \times (0.0375)^2 \times 30 \times 10^6}$$

$$\epsilon_{R_o} = -1832 \mu\text{in/in}$$

$$\epsilon_{R_o} = -\frac{3 \times 6.89 \times (8.51)^2 [1 - (0.285)^2] \times 10^6}{4 \times (0.9529)^2 \times 207 \times 10^9}$$

$$\epsilon_{R_o} = -1830 \mu\text{m/m}$$

*) Die kleinen Unterschiede zwischen den metrischen Resultaten und den U.S.-Customary-Resultaten ergeben sich aus Auf- und Abrundungen.