

DIN EN 62047-17

ICS 31.080.01; 31.220.01

Einsprüche bis 2011-08-27

Entwurf

**Halbleiterbauelemente –
Bauelemente der Mikrosystemtechnik –
Teil 17: Wölbungs-Prüfverfahren zur Bestimmung mechanischer
Eigenschaften dünner Schichten (IEC 47F/78/CD:2011)**

Semiconductor devices –

Micro- electromechanical devices –

Part 17: Bulge test method for measuring mechanical properties of thin film
(IEC 47F/78/CD:2011)

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2011-06-20 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und
Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses
Entwurfes besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise als Datei per E-Mail an dke@din.de in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann
im Internet unter www.din.de/stellungnahme oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter
www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder online im Norm-Entwurfs-Portal des DIN unter www.entwuerfe.din.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im
DIN und VDE (Hausanschrift: Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main).

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten
Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 45 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE

Inhalt

	Seite
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen.....	5
3 Begriffe und Symbole	5
4 Prinzip der Wölbungs-Beanspruchung	6
4.1 Allgemeines	6
5 Prüfverfahren	7
5.1 Allgemeines	7
5.2 Prüfeinrichtung	8
5.3 Umgebungsbedingungen während der Prüfung.....	9
6 Mikroprobe	9
6.1 Allgemeines	9
6.2 Form der Mikroprobe	10
6.3 Messung der Mikroproben-Maße	10
7 Prüfdurchführung und Datenanalyse.....	10
7.1 Allgemeines	10
7.2 Datenanalyse	11
8 Prüfbericht	11
Anhang A (informativ) Datenanalyse.....	12
A.1 Allgemeines	12
A.2 Ermittlung der mechanischen Eigenschaften mithilfe der Spannungs/Dehnungs-Kurve.....	12
A.3 Ermittlung der mechanischen Eigenschaften mithilfe der Lastverformungs-Analyse	13
Anhang B (informativ) MEMS-Prozess als Beispiel für eine Mikroprobenherstellung.....	16
B.1 Herstellung der Mikroprobe.....	16
B.2 Messung der geometrischen Kenngrößen der Mikroprobe	16
Anhang C (informativ) Verfahren zum Messen der Verformung	17
C.1 Allgemeines	17
C.2 Laser-Interferometrie	17
C.3 Kapazitätsmessverfahren	17
Literaturhinweise	22

Bilder

Bild 1 – Wölbungs-Mikroprobe	6
Bild 2 – Durch Druckeinwirkung gewölbtes Membranfenster	7
Bild 3 - Wölbungs-Prüfeinrichtung	8
Bild 4 – Formen der Wölbungs-Membranfenster	10
Bild A.1 – Ermittlung des biaxialen Elastizitätsmoduls mittels der Spannungs/Dehnungs-Kurve, welche bei der Wölbungs-Beanspruchung erhalten wurde	15
Bild B.1 – Beispiel für die Herstellung einer Bulge-Mikroprobe	16
Bild C.1 – Typisches Beispiel eines Messaufbaus zur Laser-Interferometrie	19
Bild C.2 – Typische Interferenzmuster beim Michelson- und beim ESPI-Messverfahren	19
Bild C.3 – Typisches Beispiel eines Messaufbaus unter Verwendung eines Fotodetektors	20
Bild C.4 – Schematische Darstellung eines Bulge-Kapazitäts-Messaufbaus	20
Bild C.5 – Grafische Darstellung der Wölbungs-Höhe und Kapazitätsänderung	21

Tabellen

Tabelle 1 – Symbole und Benennungen zur Mikroprobe	6
Tabelle A.1.1 – Beispiele für unterschiedliche Parameterwerte C_1 und $C_2(v)$ für quadratische Dünnschichten	14
Tabelle A1.2 – Beispiele für unterschiedliche Parameterwerte C_1 und $C_2(v)$ für kreisförmige Dünnschichten	14

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 47F/78/CD:2011 „Semiconductor devices – Micro- electromechanical devices – Part 17: Bulge test method for measuring mechanical properties of thin film“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des CD entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom SC 47F „Micro-electromechanical systems“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Die IEC und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf prEN nur 2 Monate beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

Für diesen Norm-Entwurf ist das nationale Arbeitsgremium K 631 „Halbleiterbauelemente“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf eine Norm ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils neueste gültige Ausgabe der in Bezug genommenen Norm.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe der Norm.

Der Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

**Halbleiterbauelemente –
Bauelemente der Mikrosystemtechnik –
Teil 17: Wölbungs-Prüfverfahren zur Bestimmung
mechanischer Eigenschaften dünner Schichten**

1 Anwendungsbereich

Diese Internationale Norm legt die Verfahren zum Durchführen von Wölbungs-(Bulge-)Beanspruchungen an freistehenden Dünnschicht-Mikroproben fest, die um das Wölbungs-Fenster (Bulge-Matrix) gerahmt sind. Die Dünnschicht-Mikroproben werden auf Basis von Mikro/Nano-Schicht-Werkstoffen, einschließlich Metall-, Keramik- und Polymer-Schichten, hergestellt, wobei diese Werkstoffe für MEMS-Bauteile, Mikrosystem-Bauteile und andere Bauteile verwendet werden. Die Dicke der Schichten liegt im Bereich von 0,1 µm bis 10 µm.

Die Prüfbeanspruchungen werden bei Umgebungstemperatur mithilfe einer gleichförmig verteilten Druckbeanspruchung über das Wölbungs-Fenster auf die Dünnschicht-Mikroprobe ausgeübt.

Mit diesem Prüfverfahren müssen das Elastizitätsmodul (E-Modul) und die Restspannung des Schicht-Werkstoffs bestimmt werden.

2 Normative Verweisungen

Die nachfolgend aufgeführten Dokumente sind für die Anwendung dieser Norm unbedingt erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die zitierte Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des zitierten Schriftstücks (einschließlich aller Änderungen).

IEC 62047-2:2006, *Semiconductor devices – Micro electromechanical devices – Part 2 Tensile testing method of thin film materials*

3 Begriffe und Symbole

Für die Anwendung dieser Norm werden die Form der Mikroprobe und die dazugehörigen Symbole im Bild 1 und der Tabelle 1 angegeben. Es gelten die folgenden Begriffe.

3.1

Eigenspannung

Restspannung

σ_0

Spannung, die in der Mikroprobe ohne äußere Beanspruchung vorhanden ist

3.2

biaxialer Elastizitätsmodul

M

Elastizitätsmodul bei zweidimensionalen Spannungszuständen

3.3

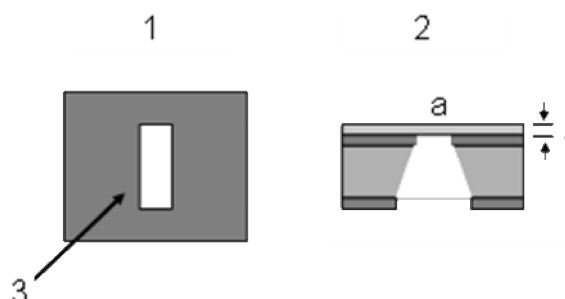
Membranfenster

Wölbungs-Fenster, Bulge-Matrix

Beanspruchungsfläche, welche im direkten Kontakt mit dem Druckmedium (Wirkmedium) steht und in der freistehenden Dünnschicht-Probe umrahmt ist (siehe Bild 1)

ANMERKUNG Übliche zweidimensionale Fensterformen sind Kreise, Rechtecke und Quadrate.

3.4

Aspektverhältnis*b/a*Verhältnis von Länge $2b$ zur Breite $2a$ für ein rechteckiges Membranfenster**Legende:**

- 1 Draufsicht
- 2 Seitenansicht
- 3 Membranfenster (Bulge-Matrix)
- a Dünnschicht-Ablagerung

Bild 1 – Wölbungs-Mikroprobe**Tabelle 1 – Symbole und Benennungen zur Mikroprobe**

Symbol	Einheit	Benennung
t	μm	Dicke der Membran oder der Dünnschicht
σ_y	MPa	Spannung bei der Werkstoff beginnt, sich plastisch zu verformen
R	μm	Radius einer gewölbten Membrane (Tiefungsradius)
h	μm	Höchstwert der vertikale Versetzung, bezogen auf den Mittelpunkt des Wölbungs-Fensters
$w(r)$	μm	vertikale Versetzung über dem Wölbungs-Fenster
d	mm	Durchmesser bei einem kreisförmigen Fenster
a, b	mm	halbe Breite, halbe Länge eines rechtwinkligen Fensters, wobei im Falle eines quadratischen Fensters $a = b$ gilt
p	MPa	Differenzdruck, der in der Druckkammer auf die Dünnschicht-Mikroprobe ausgeübt wird
C_1, C_2		Koeffizienten in der verallgemeinerten linear-elastischen Bulge-Gleichung

4 Prinzip der Wölbungs-Beanspruchung**4.1 Allgemeines**

Eine nominell freistehende, über das Wölbungs-Fenster gerahmte oder ungerahmte, Dünnschicht-Mikroprobe, wie in Bild 2 dargestellt, wird in einer Wölbungs-Prüfeinrichtung montiert und mit einem Differenzdruck beansprucht, der erforderlich ist, um eine Wölbungs-Verformung (Tiefung) der Schicht einzuleiten. Die geometrische Form des Wölbungs-Fensters kann eine der unterschiedlichen Formen wie Kreis, Rechteck oder Quadrat sein.

ANMERKUNG 1 Im Allgemeinen wird bei rechtwinkligen Fenstern ein Aspektverhältnis $b/a > 4$ empfohlen.

ANMERKUNG 2 Mit der Wahl der Fenster-Geometrie sind die entsprechenden Analysen zur Bestimmung von Spannung und Dehnung der gewölbten Schichten auf Basis unterschiedlicher Modelle durchzuführen, d. h. ein kugel- bzw. zylinderförmiges Hohlkörper-Druckmodell.

Der ausgeübte Druck sollte gleichförmig über die Schicht im Wölbungs-Fenster verteilt werden und die Schicht mit einer konstanten und relativ statischen Rate beanspruchen. Die Verformungshöhe der gewölbten Schicht und der dazugehörige Druck sind während der Druckbeanspruchung gleichzeitig zu messen. Aus Basis dieser Messdaten werden die mechanischen Eigenschaften mithilfe eines gewählten Analysemodells bestimmt.

ANMERKUNG 3 Einzelheiten zu den Analysemodellen sind im Anhang A beschrieben.

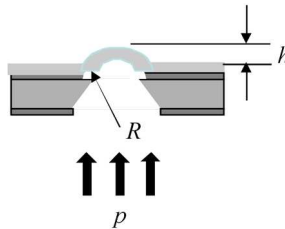


Bild 2 – Durch Druckeinwirkung gewölbtes Membranfenster

5 Prüfverfahren

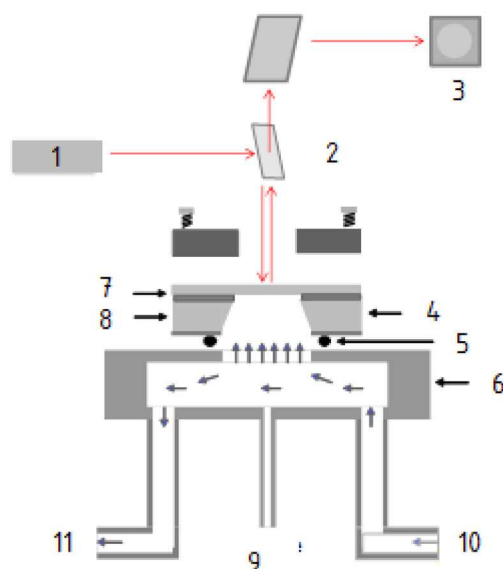
5.1 Allgemeines

Die Bulge-Mikroprobe sollte mithilfe elektromechanischer Fertigungsverfahren aus Mikro/Nano-Schicht-Werkstoffen für MEMS-Bauteile, Mikrosystem-Bauteile und anderen Bauteilen hergestellt werden. Das Membranfenster hat eine der verschiedenen Formen Kreis, Rechteck oder Quadrat. Die Membrane wird durch Druckbeanspruchung, die über eine Druckeinrichtung ausgeübt wird, gewölbt.

ANMERKUNG 1 Im Allgemeinen besteht die Druckeinrichtung aus einer Druck-Regereinheit, Drucksensor und einer Bulge-Kammer (Druckkammer).

Mit dem Ausüben der Druckbeanspruchung auf die Mikroprobe muss die Verformungswirkung, d. h. Bulge-Höhenänderung, im Wölbungs-Fenster gemessen werden.

ANMERKUNG 2 Im Allgemeinen besteht die Wölbungs-Prüfeinrichtung, so wie in Bild 3 dargestellt, aus Druckeinrichtung, Probenhalterung und der Einrichtung zum Messen der Wölbungs-Höhe.

**Bestandteile**

1: Laser	2: Spiegel	3: Sensor
4: Mikroprobe	5: O-Ring	6: Bulge-Kammer
7: Membranfenster	8: Substrat	9: Druckmesseinrichtung
10: Einlass	11: Auslass	

Bild 3 - Wölbungs-Prüfeinrichtung**5.2 Prüfeinrichtung****5.2.1 Druckeinrichtung**

Die Druckeinrichtung sollte so beschaffen sein, dass ein bestimmter oder ständiger Druck mit einer geregelten Rate auf das Membranfenster für eine Wölbungs-Beanspruchung ausgeübt werden kann. Das Druckmedium kann Öl, Gas oder destilliertes Wasser sein. Im Allgemeinen kann die Druckeinrichtung aus einem Drucksensor und einer Druck-Regeleinheit bestehen.

ANMERKUNG Bei den Drücken, welche bei diesen Prüfverfahren auftreten, ist Luft mehr als millionenfach stärker zu komprimieren als übliche Flüssigkeiten wie Öl und destilliertes Wasser. Die Regeleinheit hat eine Genauigkeit von kleiner 1 % bezogen auf den vollen Messbereich.

5.2.2 Wölbungs-Kammer (Druckkammer)

Die Druckkammer sollte so kompakt wie möglich sein, um die Übereinstimmung der Prüfeinrichtung zu reduzieren. Das Volumen, das zu komprimieren ist und das die Übereinstimmung beeinflussen könnte, würde minimiert werden.

ANMERKUNG Falls eine Flüssigkeit zur Druckausübung in der Prüfeinrichtung verwendet wird, enthält das Drucksystem so wenig Luft wie möglich, weil selbst eine kleine Luftblase, die innerhalb des Drucksystems eingeschlossen ist, die Übereinstimmung der Prüfeinrichtung beeinflussen kann. Es wird deshalb empfohlen, die Prüfeinrichtung einschließlich der Druckkammer so zu gestalten, dass es keine Stellen gibt, wo sich Luftblasen halten können, und dass die Flüssigkeit leicht eingefüllt werden kann. Es ist besonders erforderlich, darauf zu achten, keine Luftblasen einzubringen, wenn die Mikroprobe befestigt oder entfernt wird.

Der Werkstoff der Druckkammer sollte in Abhängigkeit von Druckmedium und des Bereiches für die Druckbeanspruchung gewählt werden.

ANMERKUNG Es wird empfohlen, falls eine Flüssigkeit zur Druckausübung in der Prüfeinrichtung verwendet wird, die Prüfeinrichtung mittels transparenten Plexiglasses (Polymethylacrylat) zu bauen, um Luftblasen zu vermeiden und zu sehen, ob sich große Luftblasen in der Druckkammer befinden.

Die Wölbungs-Kammer wird mit der Druckeinrichtung verbunden, um somit eine Mikroprobe genau geregelt zu verformen. Die Mikroprobe wird auf der Wölbungs-Kammer mithilfe mechanischer Haltevorrichtungen, Epoxidklebstoffen usw. befestigt.

ANMERKUNG Im Falle der Kapazitätsmessmethode befindet sich in der Wölbungs-Kammer sowohl eine Elektrode als auch ein mechanisches Distanzstück. Die Elektrode, mit der die durch die Verformung verursachte Höhenänderung der Bulge-Mikroprobe gemessen wird, ist eine kupferkaschierte Leiterplatte. Mit dem mechanischen Distanzstück, das zwischen der Mikroprobe und der Elektrode angebracht ist, wird die Empfindlichkeit der Kapazitätsänderung durch Einstellen der Dicke des Distanzstückes geregelt.

Der Druck innerhalb der Wölbungs-Kammer ist zu überwachen und mithilfe eines geeigneten Drucksensors zu messen, der entweder direkt in der Kammer angebracht ist oder über eine verbundene Röhre, die den Druck zur Messung verlustlos weiterleitet.

ANMERKUNG Es wird empfohlen, dass die wirksame Fläche des Drucksensors gegenüber dem Druckmedium zu minimieren ist und sie sollte weiterhin keine Vertiefungen oder Kavitäten haben, in denen Luft anhaften kann.

Es wird empfohlen, dass die Nichtlinearität und Hysterese des Drucksensors kleiner 0,5 % sein sollte und er entsprechend nationaler Normen kalibriert wurde.

5.2.3 Einrichtung zum Messen der Höhe

Die Einrichtung zum Messen der Höhe sollte sowohl in einer Position angeordnet werden, die zum Messen der Verformung des Membranfensters geeignet ist, als auch geeignet sein, die maximale Verformung des Membranfensters, das infolge der Druckbeanspruchung gewölbt wird, kontinuierlich zu messen. Die maximale Verformung des Membranfensters kann ermittelt werden, indem die gesamte Fläche oder die obere Spitze der gewölbten Fläche gemessen wird und zwar entweder mit einer Laser-Interferometrie- oder Kapazitäts-Messeinrichtung, so wie diese detailliert in Anhang C beschrieben sind.

Die Verformung eines gewölbten Membranfensters sollte in μm gemessen werden. Eine Messabweichung von $< 0,1 \%$ bezogen auf den Skalenendwert ist wesentlich für eine genaue Messung.

5.3 Umgebungsbedingungen während der Prüfung

Es wird empfohlen, eine Prüfbeanspruchung unter konstanten Temperatur- und Luftfeuchtebedingungen durchzuführen. Temperaturänderungen können eine thermische Drift während der Messung der Durchbiegung verursachen. Die Temperaturänderung sollte $< 2^\circ$ während der Beanspruchung sein.

6 Mikroprobe

6.1 Allgemeines

Beim Präparieren der Mikroprobe sind die gleichen Fertigungsverfahren wie die von tatsächlichen Bauteilen oder Werkstoffen zu verwenden.

Es gibt viele Fertigungsverfahren für die Mikroproben, die von den jeweiligen Anwendungsfällen abhängig sind. Beispielsweise ist die Herstellung einer gerahmten Mikroprobe im Anhang B beschrieben.

Eine ungerahmte Dünnschicht-Mikroprobe kann mithilfe des galvanischen Beschichtens präpariert werden.

6.2 Form der Mikroprobe

Die Mikroprobe wird gestaltet, um die Bulge-Analyse zu validieren. Die Form der Membranfenster kann rechteckig, quadratisch oder kreisförmig sein. Das Membranfenster ist mit einem dicken Substratrahen umgeben, der durch die Druckbeanspruchung nicht verformt wird.

ANMERKUNG Im Falle eines rechteckigen Fensters wird empfohlen, dass das Aspektverhältnis von Länge zur Breite des rechteckigen Membranfensters wegen der zweidimensionalen Dehnungseigenschaft > 4 sein sollte.

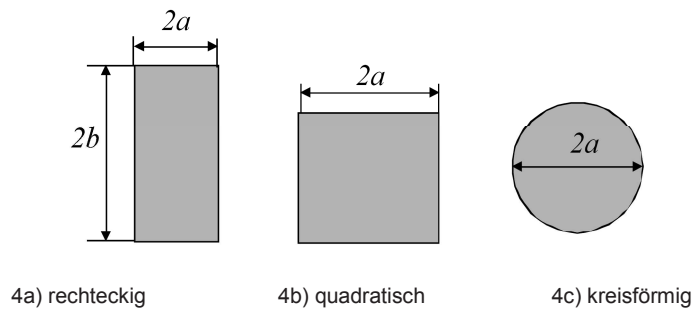


Bild 4 – Formen der Wölbungs-Membranfenster

6.3 Messung der Mikroproben-Maße

Um die Prüfdaten zu analysieren, ist es erforderlich, die Maße der Mikroprobe und den Druck genau zu messen, weil die Maße verwendet werden, um die mechanischen Eigenschaften des zu prüfenden Werkstoffs zu bestimmen. Die Dicke (t) sollte mit einer sehr großen Genauigkeit besser $\pm 5\%$ gemessen werden. Verfahren zur Schichtdickenmessung und Fehler sind in IEC 62047-2:2006, Anhang C.4, angegeben. Besondere Sorgfalt sollte darauf gelegt werden, Beschädigungen an der Mikroprobe während des Messens zu vermeiden.

7 Prüfdurchführung und Datenanalyse

7.1 Allgemeines

- (1) Die Bulge-Mikroprobe wird auf der Wölbungs-Kammer, die mit dem Druckmedium verbunden ist, befestigt. Häufig wird ein O-Ring verwendet, um die Verbindung zwischen Mikroprobe und Wölbungs-Kammer gegen Leckagen abzudichten.

ANMERKUNG Der O-Ring sollte sehr sorgfältig auf die Wölbungs-Kammer gesetzt werden, um eine Abweichung der Wölbungs-Höhe zu vermeiden.

- (2) Mechanische Befestigung mithilfe von Schrauben wird angewendet, um den Spalt zwischen Wölbungs-Kammer und Mikroprobe zu verschließen. Für die Probenbefestigung werden häufig Epoxidklebstoffe empfohlen.
- (3) Es ist vorteilhaft, die Befestigung mit ihrer Wirkung auf die Wölbungs-Höhenänderung zu überprüfen. Eine kraftvolle Befestigung der Mikroprobe verursacht häufig Spannungen auf dem Membranfenster. Um allerdings Leckagen der Drucks in der Wölbungs-Kammer zu vermeiden, ist ein gutes Verfahren zum Abdichten für dieses Prüfverfahren erforderlich.
- (4) Der Druck sollte, sorgfältig geregelt, auf der Schicht monoton zunehmen, um eine quasi-statische Verformung der Schicht zu erhalten. Zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls der Schicht sind einige druckmindernde Schritte während der Druckbeanspruchung erforderlich. Es wird empfohlen, dass der Mindestdruck bei jedem Druckminderungsschritt 50 % größer sein sollte als der ursprüngliche Druckwert zu Beginn des Druckminderungsschritts. Von der linear-elastischen Reaktion, die während des Druckminderungsschritts erhalten wird, werden die Neigungen bestimmt. Dabei bedeutet jede der Neigungen ein bestimmter biaxialer Elastizitätsmodul der angepassten Schicht.

ANMERKUNG 1 Besondere Sorgfalt sollte auf die Vermeidung zyklischer Effekte auf die mechanischen Eigenschaften der Schicht bei übermäßiger Wiederholung der Druckminderungsschritte gelegt werden. Die Prüfbeanspruchung sollte innerhalb der entsprechenden plastischen Verformung der Mikroprobe durchgeführt werden; dabei wird empfohlen, dass die plastische Verformung nicht > 2 % bezogen auf die Dehnung sein sollte.

ANMERKUNG 2 Durchschnittswerte für E-Moduln können mithilfe vernünftig wiederholter Druckzunahme- und Druckminderungsschritte bestimmt werden.

Während der Drucksteigerungs- und Druckminderungsschritte sollte sowohl der Druck als auch die Verformung im Fenster gleichzeitig sehr genau gemessen werden. Im Allgemeinen können zum Messen der Verformung solche Verfahren wie Laserscanning, Laserinterferometrie, Speckle-Interferometrie und Kapazitätsänderung verwendet werden. Beispiele zu diesen Verfahren sind in Anhang C beschrieben.

ANMERKUNG Der O-Ring sollte sehr sorgfältig auf der Bulge-Kammer montiert werden, um eine Abweichung der Bulge-Höhe zu vermeiden.

7.2 Datenanalyse

Sowohl die bei der Wölbungs-Beanspruchung gemessene Höhe des Membranfensters als auch der Druck werden verwendet, um den E-Modul und die Eigenspannung der Membran zu bestimmen. Die mechanischen Eigenschaften werden unter mithilfe zweier Verfahren bestimmt.

- Anpassungsverfahren (Fitting) in der Druck/Höhe-Kurve
- Berechnung in Spannungs/Dehnungs-Kurve

Die Analyseverfahren werden ausführlich im Anhang A beschrieben.

8 Prüfbericht

Der Prüfbericht sollte mindestens die folgenden Angaben enthalten:

- a) Verweis auf diese internationale Norm;
- b) Identnummer der Mikroprobe;
- c) Herstellungsverfahren der Mikroprobe;
- d) Werkstoff der Mikroprobe;
- e) Maße der Mikroprobe und das dazugehörige Messverfahren;
- f) Beschreibung der Prüfeinrichtung;
- g) gemessene Kenngrößen mit Prüfdaten: Elastizitätsmodul, Dehngrenze und Eigenspannung.

Anhang A (informativ)

Datenanalyse

A.1 Allgemeines

Die zwei Kenngrößen Druck p und Verformungshöhe h , die bei der Prüfbeanspruchung erhalten werden, liefern die mechanischen Eigenschaften wie E-Modul und Eigenspannung der Schicht. Diese Eigenschaften können mithilfe eines entsprechend ausgewählten Analyse- oder Experimentalmodells bestimmt werden, d. h. mit der verallgemeinerten linear-elastische Bulge-Gleichung und der Spannungs/Dehnungs-Kurve.

A.2 Ermittlung der mechanischen Eigenschaften mithilfe der Spannungs/Dehnungs-Kurve

Die Form der Schicht, die durch Druckausübung gewölbt wird, kann als ein dünnwandiger kugel- oder zylinderförmiger Kessel modelliert werden und zwar mit der bei der Prüfung verwendeten Fenstergeometrie. Das bedeutet, dass die Verformungshöhe h und der dazugehörige Druck p sowohl für eine kreisförmige als auch quadratische Fenstergeometrie in Beziehung zum Verhältnis von Spannung σ und Dehnung ε stehen; die beim kreisförmigen Fenster dem kugelförmigen Kesselmodell und beim quadratischen Fenster dem zylinderförmigen Kesselmodell entsprechen. Für die kreisförmige und geometrische Fenstergeometrie werden Spannung und Dehnung wie folgt bestimmt [7]:

$$p\pi a^2 = \sigma t 2\pi R$$

$$\sigma = \frac{pR}{2t}$$

$$(R-h)^2 + a^2 = R^2$$

$$R \approx \frac{a^2}{2h}$$

$$\sigma = \frac{pa^2}{4ht}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{R\theta - a}{a}$$

$$\sin(\theta) \approx \theta - \frac{\theta^2}{6}$$

$$\varepsilon = \frac{R\theta}{R\theta\left(1 - \frac{\theta^2}{6}\right)} - 1 \approx \left(1 + \frac{\theta^2}{6}\right) - 1 = \frac{\theta^2}{6} \quad \theta \approx \frac{a}{R}$$

(A3)

Im Falle hoher Aspektverhältnisse bei rechteckigen Membranen (Aspektverhältnis $b/a > 4$) wird die Spannung mithilfe des zylinderförmigen Kesselmodells bestimmt zu (Literaturnachweis)

$$\sigma = \frac{pR}{t}$$

$$R \approx \frac{a^2}{2h}$$

$$\sigma = \frac{pa^2}{2ht}$$

$$\varepsilon = \frac{2h^2}{3a^2}$$

Details zum biaxialen Elastizitätsmodul M der Mikroprobe können mithilfe der Spannungs/Dehnungs-Kurve bestimmt werden. Die periodische Druckerhöhung und Druckminderung ist erforderlich, um den biaxialen Elastizitätsmodul zu erhalten. Der Modul ist die Neigung der Spannungs/Dehnungs-Kurve während des Druckminderungsschritts, so wie in Bild A.1 dargestellt.

ANMERKUNG Der biaxiale Elastizitätsmodul M ist definiert als $E/(1 - \nu)$ für das kreisförmige Membranfenster und als $E/(1 - \nu^2)$ für das rechteckige Membranfenster.

A.3 Ermittlung der mechanischen Eigenschaften mithilfe der Lastverformungs-Analyse

Auf Basis der Messwerte von Druck p und Verformungshöhe h der gewölbten Membran werden Einzelheiten zu mechanischen Eigenschaften der Schicht hergeleitet. Für eine quadratische Schicht der Seitenlänge a und der Dicke t können Eigenspannung σ und E-Modul E näherungsweise bestimmt werden, und zwar mithilfe der Kleinste-Quadrate-Methode zwischen Druck/Höhe-Kurve nach der verallgemeinerten linear-elastischen Bulge-Gleichung, die im Folgenden angegeben ist;

$$p_{\text{spherical}} = \frac{8Et}{3a^4(1-\nu)} h^2$$

$$p_{\text{cylindrical}} = \frac{4Et}{3a^4(1-\nu^2)} h^2$$

Die Beziehung zwischen Spannung und Dehnung ist gegeben mit

$$\sigma = M\varepsilon + \sigma_0$$

Umformen der Relation zwischen Spannung/Dehnung und geometrischen Kenngrößen

$$p_{\text{spherical}} = 4 \frac{\sigma_0 t}{a^2} h + \frac{8}{3} \frac{Et}{a^4(1-\nu)} h^3$$

$$p_{\text{cylindrical}} = 2 \frac{\sigma_0 t}{a^2} h + \frac{4}{3} \frac{Et}{a^4(1-\nu)} h^3$$

Druck und Versetzung werden verallgemeinert ausgedrückt zu

$$p = C_1 \frac{\sigma_0 t}{a^2} h + C_2(\nu) \frac{Et}{a^4} h^3 \quad (\text{A.1})$$

Dabei ist h die maximale Höhe (Versetzung) bezogen auf den Mittelpunkt der Membran und ν ist die Poissonzahl (Querdehnungszahl) des Werkstoffs.

ANMERKUNG Mit der o. a. Gleichung kann bewiesen werden, dass die Eigenspannung eine signifikante Wirkung auf das Verhalten dünner Schichten bei kleinen Versetzungen hat, während der E-Modul das mechanische Verhalten bei großen Versetzungen bestimmt. Die Länge der Membran ist hundertmal größer als die Membrandicke und somit ist die Versetzung der Membran viel größer als die Membrandicke.

Die Parameterwerte C_1 und $C_2(\nu)$ werden über das Anpassungsverfahren der Prüfergebnisse bestimmt.

ANMERKUNG Für eine bessere Anpassung bezüglich der Prüfergebnisse werden verschiedene Werte für die Parameter C_1 und $C_2(\nu)$ vorgeschlagen. In den Tabellen A.1.1 und A.1.2 werden übliche Werte als Beispiele für quadratische und kreisförmige Dünnschichten angegeben.

Tabelle A.1.1 – Beispiele für unterschiedliche Parameterwerte C_1 und $C_2(\nu)$ für quadratische Dünnschichten

Siehe Literaturnachweise zu Einzelheiten

Modell	C_1	$C_2(\nu)$	Literaturhinweis
analytisch	3,04	$1,37 \times (1,075 - 0,292\nu)$	[1]
FEM	3,41	$1,37 \times (1,446 - 0,427\nu)$	[1]
analytisch	3,45	$1,994 \times (1 - 0,271\nu)$	[2]
analytisch	3,04	$1,473 \times (1 - 0,272\nu)$	[3]
analytisch	3,39	$(0,8 - 0,062\nu)^3$	[4]

Tabelle A1.2 – Beispiele für unterschiedliche Parameterwerte C_1 und $C_2(\nu)$ für kreisförmige Dünnschichten

Modell	C_1	$C_2(\nu)$	Literaturhinweis
analytisch	4,0	2,67	[1]
FEM	4,0	$2,67 \times (1,026 - 0,233\nu)^{-1}$	[1]
analytisch	4,0	2,67	[5]
FEM	4,0	$2,67 \times (1,0 - 0,241\nu)^{-1}$	[5]