

DIN EN 62047-12

ICS 31.080.01; 31.220.01

**Halbleiterbauelemente –
Bauelemente der Mikrosystemtechnik –
Teil 12: Verfahren zur Prüfung der Biege-Ermüdungsfestigkeit von
Dünnschichtwerkstoffen unter Verwendung der
Resonanzschwingungen bei MEMS-Strukturen
(IEC 62047-12:2011);
Deutsche Fassung EN 62047-12:2011**

Semiconductor devices –

Micro-electromechanical devices –

Part 12: Bending fatigue testing method of thin film materials using resonant vibration of
MEMS structures

(IEC 62047-12:2011);

German version EN 62047-12:2011

Dispositifs à semiconducteurs –

Dispositifs microélectromécaniques –

Partie 12: Méthode d'essai de fatigue en flexion des matériaux en couche mince utilisant
les vibrations à la résonance des structures à systèmes microélectromécaniques (MEMS)
(CEI 62047-12:2011);

Version allemande EN 62047-12:2011

Gesamtumfang 31 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn für die von CENELEC am 2011-10-18 angenommene Europäische Norm als DIN-Norm ist 2012-06-01.

Nationales Vorwort

Vorausgegangener Norm-Entwurf: E DIN IEC 62047-12:2010-05.

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

Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom SC 47F „Micro-electromechanical systems“ erarbeitet.

Das IEC-Komitee hat entschieden, dass der Inhalt dieser Publikation bis zu dem Datum (stability date) unverändert bleiben soll, das auf der IEC-Website unter „<http://webstore.iec.ch>“ zu dieser Publikation angegeben ist. Zu diesem Zeitpunkt wird entsprechend der Entscheidung des Komitees die Publikation

- bestätigt,
- zurückgezogen,
- durch eine Folgeausgabe ersetzt oder
- geändert.

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 12: Verfahren zur Prüfung der Biege-Ermüdungsfestigkeit von
Dünnschichtwerkstoffen unter Verwendung der Resonanzschwingungen bei
MEMS-Strukturen
(IEC 62047-12:2011)

Semiconductor devices –
Micro-electromechanical devices –
Part 12: Bending fatigue testing method of thin
film materials using resonant vibration of MEMS
structures
(IEC 62047-12:2011)

Dispositifs à semiconducteurs –
Dispositifs microélectromécaniques –
Partie 12: Méthode d'essai de fatigue en flexion
des matériaux en couche mince utilisant les
vibrations à la résonance des structures à
systèmes microélectromécaniques (MEMS)
(CEI 62047-12:2011)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 2011-10-18 angenommen. Die CENELEC-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist.

Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Zentralsekretariat oder bei jedem CENELEC-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CENELEC-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Zentralsekretariat mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CENELEC-Mitglieder sind die nationalen elektrotechnischen Komitees von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Türkei, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.

CENELEC

Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung
European Committee for Electrotechnical Standardization
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

Zentralsekretariat: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

© 2011 CENELEC – Alle Rechte der Verwertung, gleich in welcher Form und in welchem Verfahren, sind weltweit den Mitgliedern von CENELEC vorbehalten.

Ref. Nr. EN 62047-12:2011 D

Vorwort

Der Text des Dokumentes 47F/80/FDIS, zukünftige Ausgabe 1 der IEC 62047-12, erarbeitet durch SC 47F „Micro-electromechanical systems“ des IEC TC 47 „Semiconductor devices“ wurde zur parallelen IEC-CENELEC-Abstimmung vorgelegt und von CENELEC als EN 62047-12:2011 angenommen.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem die EN auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss (dop): 2012-07-18
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die der EN entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2014-10-18

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CENELEC [und/oder CEN] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Anerkennungsnotiz

Der Text der Internationalen Norm IEC 62047-12:2011 wurde vom CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm angenommen.

In der offiziellen Fassung ist unter „Literaturhinweise“ zu der aufgelistete Norm die nachstehende Anmerkung einzutragen:

IEC 62047-2:2006 ANMERKUNG Harmonisiert als EN 62047-2:2006 (nicht modifiziert).

Inhalt

	Seite
Nationales Vorwort	2
Vorwort	2
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriffe	5
4 Prüfeinrichtung	6
4.1 Allgemeines	6
4.2 Aktor	6
4.3 Sensor	7
4.4 Regeleinheit	7
4.5 Aufzeichnungseinheit	7
4.6 Parallele Prüfdurchführung	7
5 Prüfbauteil	8
5.1 Allgemeines	8
5.2 Resonanzeigenschaften	8
5.3 Schwingbeanspruchtes Teil	8
5.4 Herstellung des Prüfbauteiles	8
6 Prüfbedingungen	8
6.1 Prüfamplitude	8
6.2 (Last-)Spannungsverhältnis	9
6.3 Schwingspielfrequenz	9
6.4 Schwingungsform	9
6.5 Prüfdauer (Beanspruchungsdauer)	9
6.6 Prüfumgebung	9
7 Anfangsmessungen	9
7.1 Messung der (mechanischen) Referenzfestigkeit	9
7.2 Messung des Frequenzgangs	10
8 Prüfdurchführung	10
8.1 Allgemeines	10
8.2 Anfangsbeanspruchung	10
8.3 Prüfmonitoring	11
8.4 Zählen der Schwingspiele	11
8.5 Beenden der Prüfbeanspruchung	11
8.6 Prüfdatenaufzeichnung	11
9 Prüfbericht	11
Anhang A (informativ) Beispiel für eine Prüfung unter Verwendung eines elektrostatischen Bauteils mit integrierter Schwingungserreger- und Auslenkungsdetektor-Komponente	13
A.1 Prüfbauteil	13
A.2 Prüfeinrichtung	14

	Seite
A.3 Prüfbedingungen	15
A.4 Anfangsmessungen	15
Anhang B (informativ) Beispiel einer Prüfung unter Verwendung eines externen Schwingungserregers und eines Bauteils mit einer integrierten Dehnungsmessanzeige zur Ermittlung der Auslenkung	16
B.1 Prüfbauteil	16
B.2 Prüfeinrichtung	16
B.3 Prüfbedingungen	17
B.4 Anfangsmessungen	18
Anhang C (informativ) Beispiel einer Schwingungsbeanspruchung eines elektromagnetischen Schwingungserregers außerhalb der Bauteileebene (externe Schwingungserregerbeanspruchung)	19
C.1 Prüfbauteil	19
C.2 Prüfeinrichtung	20
C.3 Anfangsmessungen	21
Anhang D (informativ) Theoretische Berechnung der Ermüdungsfestigkeit spröder Werkstoffe unter Verwendung der Gesetze von Paris und der Weibullverteilung	22
D.1 Zusammenhang von (mechanischer) Spannung und Ermüdungsfestigkeit	22
D.2 Verteilung der Ermüdungsfestigkeit	23
D.3 Wirkung der Anfangsbeanspruchung	24
Anhang E (informativ) Analysebeispiele	25
E.1 Prüfdaten zur Ermüdungsfestigkeit von Silizium	25
E.2 Anpassung der S-N-Kurve	26
E.3 Vorhersage der Ermüdungsfestigkeit von Polysilizium	27
Literaturhinweise	28
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen	29
Bilder	
Bild 1 – Prinzipdarstellung des Prüfverfahrens	6
Bild A.1 – Mikroskopische Aufnahme des Prüfbauteils	13
Bild A.2 – Prinzipdarstellung des Prüfaufbaus	14
Bild B.1 – Aufbau des Prüfbauteils	16
Bild B.2 – Funktionsschaltbild der Prüfeinrichtung	17
Bild C.1 – Prüfbauteil für nicht in Längsrichtung schwingende Beanspruchung	19
Bild C.2 – Funktionsschaltbild der Prüfeinrichtung	20
Bild E.1 – Beispiel von Ermüdungsprüfdaten für Silizium	26
Bild E.2 – Statische Festigkeit und Ermüdungsdauer von Polysilizium in dreidimensionaler Darstellung	27

1 Anwendungsbereich

In diesem Teil der IEC 62047 ist ein Prüfverfahren zur Ermüdungsfestigkeit bei Biegebeanspruchungen (Schwingfestigkeit) mechanischer Strukturen im Mikrometerbereich von MEMS-Bauteilen (Bauteile der Mikrosystemtechnik) und Mikromaschinen festgelegt, wobei deren Resonanzschwingverhalten genutzt wird. Diese Norm ist anwendbar auf schwingende Strukturen im Größenbereich von 10 µm bis 1 000 µm in der Längsachse und von 1 µm bis 100 µm in der Dicke und auf zu prüfende Werkstoffstrukturen in den Abmessungen kleiner 1 mm Länge, kleiner 1 mm Breite und in der Dicke zwischen 0,1 µm und 10 µm.

Die hauptsächlichen Strukturwerkstoffe für Mikrosystembauteile, Mikromaschinen usw. haben besondere Eigenschaften wie beispielsweise Abmessungen im Mikrometerbereich, Werkstoffherstellung mit Hilfe von Schichtabscheidungsverfahren und der Herstellung von Prüfbauteilen unter Verwendung nichtmechanischer Verarbeitungsverfahren einschließlich der Fotolithografie. Die MEMS-Strukturen haben häufig höhere resonante Grundschrwingungen und höhere mechanische Spannungen als Strukturen im Makrobereich. Um die Lebensdauer von MEMS-Strukturen zu ermitteln, ist es notwendig, ein Prüfverfahren zur Ermüdungsfestigkeit bei ultrahohen Beanspruchungszyklen (bis 10^{12}) bereitzustellen. Der Zweck dieses Prüfverfahrens für Werkstoffstrukturen im Mikrometerbereich ist die Ermittlung der mechanischen Ermüdungseigenschaften und deren Kenngrößen bei kurzen Prüfdauern durch das Ausüben von Beanspruchungen mit einer hohen mechanischen (Last-)Spannung und hoher Lastwechselfrequenz unter Nutzung der Resonanzschwingungen.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

IEC 62047-3:2006, *Semiconductor devices – Micro-electromechanical devices – Part 3: Thin film standard test piece for tensile testing*

ISO 12107, *Metallic materials – Fatigue testing – Statistical planning and analysis of data*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokumentes gelten die folgenden Begriffe.

3.1

Amplitude

halbe algebraische Differenz zwischen Höchst- und Kleinstwert in einem Beanspruchungszyklus

3.2

(Last-)Spannungsverhältnis

algebraisches Verhältnis von Höchst- und Kleinstwert der (Last-)Spannung eines Zyklus

3.3

S-N-Kurve

Wöhlerkurve

grafische Darstellung der Spannung oder Dehnung (S) über die Anzahl der Zyklen (N) bis zum Ausfall

3.4

Referenzfestigkeit

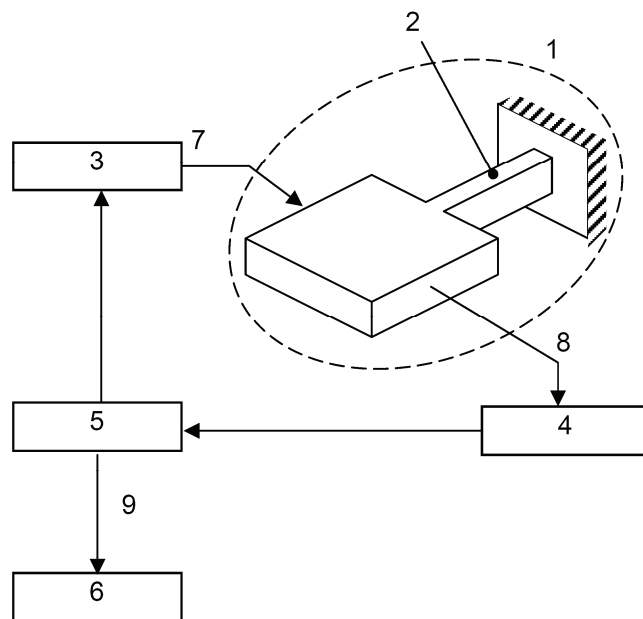
statische oder momentane Bruchfestigkeit (Kurzzeitfestigkeit)

3.5

momentane Bruchfestigkeit

Kurzzeitfestigkeit

Bruchfestigkeit bei quasi-statischer Beanspruchung oder Resonanzschwingungsbeanspruchung bei schnell zunehmender Amplitude



Legende

1 Prüfbauteil	2 (schwingungs-)beanspruchtes Teil/Schwingteil
3 Aktor	4 Sensor
5 Regeleinheit	6 Aufzeichnungseinheit
7 Kraft	8 Auslenkung/Dehnung
9 Amplitude und Frequenz	

Bild 1 – Prinzipdarstellung des Prüfverfahrens

4 Prüfeinrichtung

4.1 Allgemeines

Mit der Prüfeinrichtung muss man in der Lage sein, resonante Schwingungen, bezogen auf das Prüfbauteil, mit konstanter Amplitude und stabiler Frequenz zu erzeugen. In Bild 1 wird eine Prinzipdarstellung der Prüfeinrichtung gezeigt. Die Prüfeinrichtung besteht aus einem Aktor für die Schwingungserzeugung, einem Sensor für die Amplitudenermittlung, einer Regeleinheit zum Aufrechterhalten der Resonanzschwingungen mit konstanter Amplitude und einer Aufzeichnungseinheit für das Prüfmonitoring.

Das Verfahren zur Amplitudenregelung ist wie folgt klassifiziert:

a) Regelung auf Basis konstanter Dehnung

Am schwingbeanspruchten Teil wird die ausgeübte Dehnung konstant gehalten. Dieses Verfahren kann für elastische oder nichtduktile Werkstoffe angewendet werden.

b) Regelung auf Basis konstanter Spannung

Am schwingbeanspruchten Teil wird die ausgeübte Spannung konstant gehalten. Ein Überprüfen (Monitoring) der (Last-)Spannung und eine geschlossene Regelschleife (Closed-Loop) sind für dieses Verfahren entscheidend.

4.2 Aktor

Der Schwingungserreger muss geeignet sein, eine Kraft mit der notwendigen Amplitude und den notwendigen Frequenzen in der festgelegten Richtung auszuüben. Es können unterschiedliche Arten von Aktoren verwendet werden, wie z. B. elektrostatische, piezoelektrische, thermische oder elektromechanische Aktoren. Der Aktor darf in dem Prüfbauteil integriert sein, so wie in 5.1 beschrieben.

4.3 Sensor

Der Sensor muss für die Messung der Bewegungen des Prüfbauteils geeignet sein, um die Spannungsamplitude (bei Beanspruchung mit konstanter Spannungsamplitude) oder die Dehnungsamplitude (bei Beanspruchung mit konstanter Dehnungsamplitude) des Schwingteils zu ermitteln.

Der Sensor und die mit ihm verbundenen elektronischen Schaltungen müssen mit einer Genauigkeit der Grenzabweichung kleiner oder gleich 1 % im Bereich der Spannungs- oder Dehnungsamplitude sein.

Der Sensor sollte die Bewegung kontinuierlich messen, um sowohl eine konstante Schwingung aufrechtzuerhalten als auch den Ausfall effektiv festzustellen. Falls das Prüfbauteil aus einem elastischen Werkstoff ist und dieser Werkstoff somit keine Änderungen in den Schwingeneigenschaften zeigen wird, ist es erlaubt, die Bewegung in regulären Zeitabständen zu messen.

Die Bewegung wird über das Messen der Auslenkung des Schwingteils oder der Spannung bzw. Dehnung im Prüfbauteil ermittelt. Im Abschnitt A.2 wird ein Verfahren für das Ermitteln von Drehbewegungen des Massekörpers über Änderungen der elektrischen Kapazität beschrieben. Im Abschnitt B.2 wird ein Verfahren unter Nutzung eines im Prüfbauteil integrierten Dehnungsmessstreifens beschrieben. Im Abschnitt C.2 wird ein Verfahren unter Nutzung einer kontaktlosen Messeinrichtung für die Auslenkung des Massekörpers des Prüfbauteils beschrieben.

4.4 Regeleinheit

Die Regeleinheit muss geeignet sein, das Schwingensignal für den Aktor zu erzeugen, und zwar abhängig vom Bewegungssignal des Sensors, um die geforderte Resonanzschwingung aufrechtzuerhalten. Während der Prüfbeanspruchung müssen sowohl Amplitude als auch Frequenz des Prüfbauteils konstant gehalten werden. Eines der beiden folgenden Verfahren sollte in Abhängigkeit von den Schwingeneigenschaften des Prüfbauteils verwendet werden.

a) Geschlossene Regelschleife (Closed-Loop-Verfahren)

Frequenz und Amplitude des Schwingensignals, das an das Prüfbauteil angelegt wird, müssen geregelt werden, um den Änderungen in der Resonanzfrequenz zu folgen. In den meisten Fällen wird das an den Aktor angelegte Signal abhängig vom Bewegungssignal des Prüfbauteils sein. Eine selbsterregte Schwingenschaltung oder eine PLL-Schaltung (en: phase-locked loop; de: Phasenregelschleife) kann als Mittel zum Aufrechterhalten der Resonanzfrequenz verwendet werden. Eine automatische Verstärkungsregelschaltung (AGC; en: automatic gain control) kann ebenso für das Aufrechterhalten einer konstanten Amplitude verwendet werden, indem die Amplitude des Schwingensignals in Abhängigkeit von der ermittelten Amplitude geändert wird.

b) Offene Regelschleife (Open-Loop-Verfahren)

Elastische und nicht duktile Werkstoffe, welche ein lineares Antwortverhalten und keine Deformationen zeigen, dürfen unter Verwendung einer offenen Regelschleife beansprucht werden. Diese Beanspruchungsart darf durchgeführt werden, indem entweder die Beanspruchung in regulären Zeitabständen unterbrochen wird, um die Resonanzeigenschaften zu messen, oder das Prüfbauteil vom Beginn bis zum Ende der Beanspruchung mit einer vorher festgelegten Resonanzfrequenz und Schwingensignalamplitude betrieben wird.

Die Frequenz- und Amplitudenstabilität muss während der Beanspruchung innerhalb einer Grenzabweichung kleiner oder gleich $\pm 3\%$, bezogen auf den festgelegten Wert, gehalten werden.

4.5 Aufzeichnungseinheit

Die Prüfeinrichtung muss einen Rekorder (Aufzeichnungseinheit) enthalten, um die Prüfdaten entsprechend 8.6 zu sammeln.

4.6 Parallele Prüfdurchführung

Die Prüfbeanspruchung darf parallel mit mehreren Prüfaufbauten durchgeführt werden. In diesem Fall müssen Maßnahmen ergriffen werden, um gegenseitige elektrische und/oder mechanische Interferenzen zwischen den Prüfaufbauten auszuschließen.

5 Prüfbauteil

5.1 Allgemeines

Das Prüfbauteil muss für das Beanspruchen der Schwingteile bei Resonanzfrequenz mit einer konstanten und hohen Beanspruchungsamplitude geeignet sein. Beispiele von besonderen Prüfbauteilen werden in den Abschnitten A.1, B.1 und C.1 gezeigt.

Es ist erlaubt, einen Mechanismus für die Schwingerregung oder die Ermittlung der Prüfbauteilbewegungen in das Prüfbauteil zu integrieren. Im Abschnitt A.1 wird ein Beispiel für integrierte Mechanismen zur Schwingungserregung und Amplitudenermittlung gezeigt. Im Abschnitt B.1 wird ein Prüfbauteil für einen integrierten Mechanismus als Beispiel ausschließlich für die Ermittlung der Amplitude beschrieben.

5.2 Resonanzeigenschaften

Das Prüfbauteil muss Resonanzeigenschaften haben, die das Betreiben bei festgelegter Deformation (Schwingungsmodus) bei einer spezifischen Frequenz (Resonanzfrequenz) bezogen auf das Prüfbauteil erlauben. Die Resonanzfrequenz sollte vorzugsweise größer als 1 000 Hz sein, um eine große Anzahl von Schwingspielen innerhalb kurzer Prüfdauern zu erhalten. Der Gütefaktor des Prüfbauteils sollte größer als 100 sein, um eine große Amplitude zu erhalten. Es sollten Maßnahmen durchgeführt werden, um bei dieser Resonanzfrequenz sicherzustellen, dass das Prüfbauteil nicht in einem anderen Schwingmodus schwingt als dem in diesen Prüfverfahren verwendeten Schwingmodus. Beispielsweise sollte es keine anderen Resonanzmodi nahe dem bei der Beanspruchung verwendeten Modus geben.

5.3 Schwingbeanspruchtes Teil

Das Prüfbauteil muss ein schwingbeanspruchtes Teil haben, in dem die mechanische Spannung ausreichend groß ist, um einen Ausfall zu verursachen. Wenn dieses Prüfverfahren verwendet wird, um die Zuverlässigkeit von tatsächlich in der Praxis verwendeten Bauteilen zu bestimmen, muss die Deformation dieses schwingbeanspruchten Teils bei Resonanzfrequenz (Biegen sowohl in Längsachse als auch außerhalb der Längsachse) gleich der des tatsächlichen Bauteils sein. Falls nur eine kleine Spannung, bezogen auf das dem tatsächlichen Bauteil ähnliche Prüfbauteil, verwendet werden darf, kann eine Kerbe oder ein anderes Mittel verwendet werden, um eine Spannungskonzentration in der Nähe des gewünschten Abschnitts des schwingbeanspruchten Teils zu erhalten.

5.4 Herstellung des Prüfbauteiles

Für die Herstellung des Prüfbauteils bzw. des schwingbeanspruchten Teils gilt IEC 62047-3, Abschnitt 5. Das Prüfbauteil sollte nach dem gleichen Verfahren wie die für die Zuverlässigkeitsuntersuchungen hergestellten MEMS-Bauteile gefertigt werden. Außerdem sollten die gleichen geometrischen Formen, Abmessungen und Mehrfachbeschichtungen verwendet werden.

6 Prüfbedingungen

6.1 Prüfamplitude

Die Prüfamplitude sollte in Abhängigkeit von der entsprechenden Referenzfestigkeit des Prüfbauteils festgelegt werden. Die Referenzfestigkeit sollte entsprechend 7.1 bestimmt werden. Eines der folgenden Verfahren sollte für das Ermitteln der Prüfamplitude während der Beanspruchung auf Basis der Referenzfestigkeit verwendet werden.

- a) Konstante Amplitude mit einem Wert von 100 % bezogen auf die Referenzfestigkeit:
zur Ermittlung der Ermüdungsdauer bei einer festgelegten Amplitude.
- b) Graduelles Verkleinern der Amplitude, ausgehend von einem Höchstwert:
zur Ermittlung einer S-N-Kurve innerhalb einer kurzen Zeitspanne.