

DIN EN 62969-3



ICS 31.080.01; 43.040.10

Einsprüche bis 2016-06-29

Entwurf

**Halbleiterbauelemente –
Halbleiterschnittstelle für Automobile –
Teil 3: Stoßgeführtes piezoelektrisches Energie-Harvesting bei
Automobil-Sensoren
(IEC 47/2274/CD:2016)**

Semiconductor devices –
Semiconductor interface for automotive vehicles –
Part 3: Shock driven piezoelectric energy harvesting for automotive vehicle sensors
(IEC 47/2274/CD:2016)

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2016-04-29 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 online im Norm-Entwurfs-Portal des DIN unter www.entwuerfe.din.de bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an dke@vde.com möglichst 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 in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, 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 39 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Inhalt

	Seite
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	6
3.1 Allgemeine Begriffe	6
3.2 Piezoelektrischer Wandler	9
3.3 Wesentliche Kenngrößen	9
4 Wesentliche Grenzwerte und Kenngrößen	11
4.1 Kennzeichnung und Bauart	11
4.2 Grenzwerte und Betriebsbedingungen	11
4.3 Zusätzliche Angaben	12
5 Prüfverfahren	12
5.1 Allgemeines	12
5.2 Elektrische Kenngrößen	14
5.2.1 Prüfdurchführung	14
5.2.2 Kapazität	15
5.2.3 Eigenfrequenz	15
5.2.4 Dämpfungsverhältnis	16
5.2.5 Ausgangsspannung	16
5.2.6 Ausgangsstrom	17
5.2.7 Ausgangsleistung	17
5.2.8 Optimale Lastimpedanz	18
5.2.9 Ausgangshöchstleistung	18
5.3 Mechanische Kenngrößen	19
5.3.1 Prüfdurchführung	19
5.3.2 Temperaturbereich	21
5.3.3 Stoßamplitude	21
5.3.4 Temperatur- und Luftfeuchte-Prüfung	21
5.3.5 Mechanische Zuverlässigkeits-(Stoß-)Prüfung	21
Literaturhinweise	22
Bilder	
Bild 1 – Stoßbetriebener Energie-Harvester, bei dem ein Cantilever mit piezoelektrischer Schicht verwendet wird	7
Bild 2 – Prinzipdarstellung des stoßbetriebenen piezoelektrischen Energie-Harvesters	8
Bild 3 – Äquivalentes Ersatzschaltbild des stoßbetriebenen piezoelektrischen Energie-Harvesters	10
Bild 4 – Messdurchführung des stoßbetriebenen piezoelektrischen Energie-Harvesters	13
Bild 5 – Prüfaufbau zur elektrischen Charakterisierung des stoßbetriebenen piezoelektrischen Energie-Harvesters	15
Bild 6 – (a) Ausgangs-Kurve und (b) deren Frequenzanteile eines stoßbetriebenen	

	Seite
piezoelektrischen Energie-Harvesters	16
Bild 7 – Ausgangsspannung des stoßbetriebenen piezoelektrischen Energie-Harvesters in Abhängigkeit von verschiedenen Lasten	17
Bild 8 – Ausgangsstrom des stoßbetriebenen piezoelektrischen Energie-Harvesters in Abhängigkeit von verschiedenen Ausgangsspannungen	17
Bild 9 – Ausgangsleistung des stoßbetriebenen piezoelektrischen Energie-Harvesters in Abhängigkeit von verschiedenen Ausgangslasten	18
Bild 10 – Ausgangsleistung und –spannung des stoßbetriebenen piezoelektrischen Energie- Harvesters in Abhängigkeit von verschiedenen Stoßamplituden	18
Bild 11 – Blockschaltbild für den Prüfaufbau zur Bewertung der Zuverlässigkeit des stoßbetriebenen piezoelektrischen Energie-Harvesters	20

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 47/2274/CD:2016 „Semiconductor devices – Semiconductor interface for automotive vehicles – Part 3: Shock driven piezoelectric energy harvesting for automotive vehicle sensors„ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine autorisierte deutsche Übersetzung.

Das internationale Dokument wurde vom TC 47 „Semiconductor devices“ 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 dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium K 631 „Halbleiterbauelemente“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf ein Dokument ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnitsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils aktuellste Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments.

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

Der Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden Deutschen Dokumenten 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.

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

Das Original-Dokument enthält Bilder in Farbe, die in der Papierversion in einer Graustufen-Darstellung wiedergegeben werden. Elektronische Versionen dieses Dokuments enthalten die Bilder in der originalen Farbdarstellung.

Die deutsche Fassung wurde im Abschnitt 2 an die aktuellen Standardsätze angepasst.

**Halbleiterbauelemente –
Halbleiterschnittstelle für Automobile –
Teil 3: Stoßgeführtes piezoelektrisches Energie-Harvesting bei Automobil-
Sensoren**

Einleitung

Die Normenreihe IEC 62969 besteht aus den folgenden vier Teilen:

- IEC 62969-1 Semiconductor devices – Semiconductor interface for automotive vehicles – Part 1: General requirements of power interface for automotive vehicle sensors
- IEC 62969-2 Semiconductor devices – Semiconductor interface for automotive vehicles – Part 2: Efficiency evaluation methods of wireless power transmission using resonance for automotive vehicle sensors
- IEC 62969-3 Semiconductor devices – Semiconductor interface for automotive vehicles – Part 3: Shock driven piezoelectric energy harvesting for automotive vehicle sensors
- IEC 62969-4 Semiconductor devices – Semiconductor interface for automotive vehicles – Part 4: Evaluation methods of data interface for automotive vehicle sensors

In der Normenreihe IEC 62969 werden Stromversorgungs- und Daten-Interfaces für Sensoren in Kraftfahrzeugen (Kfz) behandelt. Im ersten Teil werden allgemeine Anforderungen und Prüfbedingungen wie Temperatur, Luftfeuchte, Vibrationen usw. für Stromversorgungs-Interfaces von Kfz-Sensoren festgelegt. Dieser Teil schließt auch verschiedene elektrische Funktionskenngößen den Spannungsabfall (voltage drop) von der Stromversorgungsquelle zu den Kfz-Sensoren, Störsignale, Spannungspegel usw. ein. Im zweiten Teil sind für Kfz-Sensoren Bewertungsverfahren zum Wirkungsgrad der „drahtlosen Energieübertragung unter Verwendung der Resonanz“ festgelegt. Im dritten Teil wird das stoßbetriebene piezoelektrische Energie-Harvesting für Kfz-Sensoren“ behandelt. Im vierten Teil sind Bewertungsverfahren für Daten-Interfaces von Kfz-Sensoren festgelegt.

1 Anwendungsbereich

In diesem Dokument sind Begriffe, Symbole, Ausbaukonfigurationen und Prüfverfahren festgelegt, die verwendet werden können, um Funktionskenngrößen der mechanischen stoßbetriebenen piezoelektrischen Energie-Harvesting-Bauelemente für Kfz-Anwendungen zu bewerten und zu bestimmen. In dieser Norm sind die Prüfverfahren und die charakteristischen Kenngrößen der mechanisch stoßbetriebenen piezoelektrischen Energie-Harvesting-Bauelemente für deren Bewertung bezüglich ihrer funktionalen Leistungsfähigkeit genau und praktikabel festgelegt. Diese internationale Norm ist ebenfalls für Motorräder, Personenkraftwagen, Lastkraftwagen und ihrer technischen Subsystem-Anwendungen ohne jegliche Beschränkung hinsichtlich der Bauelementetechnologie und Bauartgröße.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, 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 60749-5, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 5: Steady-state temperature humidity bias life test*

IEC 60749-10, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 10: Mechanical shock*

IEC 60749-12, *Semiconductor devices – Mechanical and climatic test methods – Part 12: Vibration, variable frequency*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

3.1 Allgemeine Begriffe

3.1.1

Stoß(-impuls)

mechanischer Schock

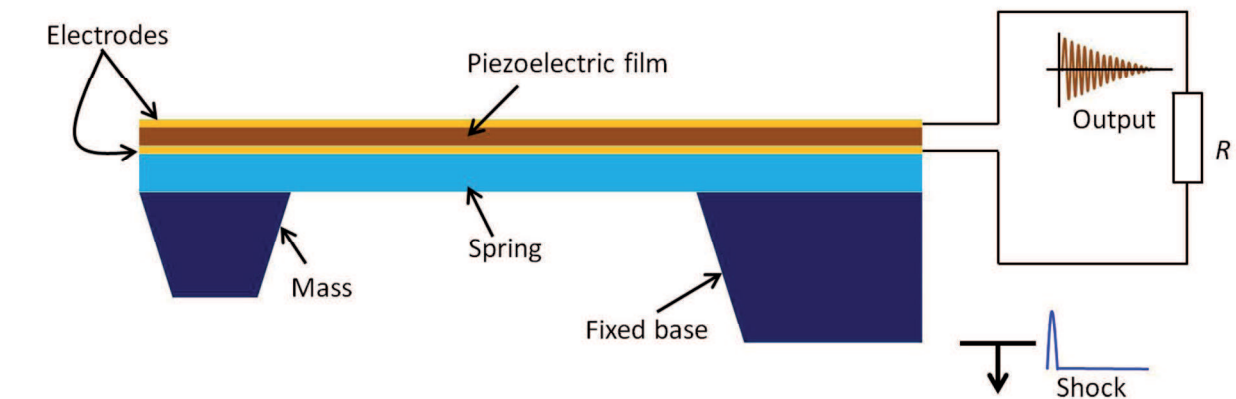
plötzliche Beschleunigung oder Verzögerung, die in einer zeitlich begrenzten physikalischen Schwingung resultiert, welche durch eine Spitzenbeschleunigung sowie Dauer und Form (rechteckig, halbsinusförmig, sägezahnförmig usw.) des Stoßimpulses gekennzeichnet ist

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Eigenfrequenz eines Kfz-Stoßimpulses variiert zwischen 0,5 Hz und 20 Hz.

3.1.2

stoßbetriebener Energie-Harvester

Generator, der auf einen einwirkenden mechanischen Stoß reagiert, den Stoß in Vibrationen (mechanische Schwingung) transformiert und die Vibration in elektrische Energie wandelt. Die erzeugte Leistung ist abhängig von den Kenngrößen des einwirkenden Stoßes sowie den mechanischen und elektrischen Eigenschaften des Generators selbst



Electrodes	Elektroden
Piezoelectric film	Piezelektrische Schicht
Mass	Masse(-körper)
Spring	Feder
fixed base	eingespannter Sockel
Output	Ausgang
Shock	Stoß

Legende

Aufbau eines Energie-Harvesters

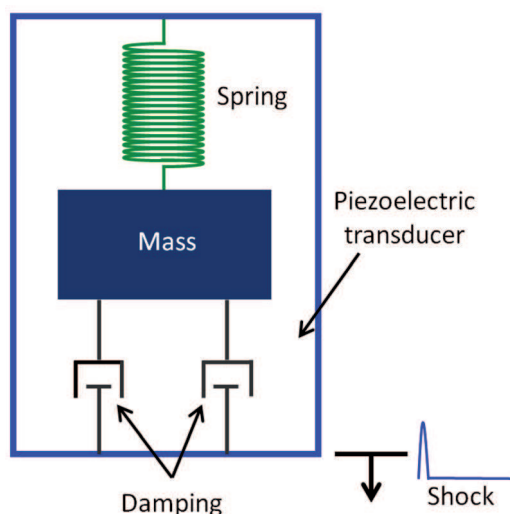
Masse(-körper)	Trägheitsmasse, um eine mechanische Schwingung als Folge eines einwirkenden Stoßes zu erzeugen
Feder	Zur Kopplung der erzeugten Schwingung auf die von der Feder gehaltenen Masse
Piezelektrische Schicht	Schichtsystem als piezelektrischer Wandler für den Energie-Harvester

Betriebskomponenten eines Energie-Harvesters

Stoß	Transiente physikalische Anregung zur Versorgung der Masseschwingung des Energie-Harvesters
R	Externe Last

ANMERKUNG Ein stoßbetriebener Energie-Harvester zur Wandlung von Stoßenergie in elektrische Energie unter Verwendung piezelektrischer Wandler setzt sich aus (Trägheits-)Masse, Feder und piezelektrischem Wandler zusammen, so wie in Bild 1 dargestellt. Der Piezowandler enthält zwei Elektroden und eine piezelektrische Schicht. Die auf den einwirkenden Stoß erzeugte Schwingung verursacht eine oszillierende Bewegung der Masse. Die Feder, welche mit der Masse verbunden ist, wird gebogen und somit erzeugt das Biegen der Feder Druck- und Zugbeanspruchungen der piezelektrischen Schicht. Die oben und unten liegenden Elektroden auf der piezelektrischen Schicht nehmen die wegen des piezelektrischen Effekts erzeugten Ladungen auf

Bild 1 – Stoßbetriebener Energie-Harvester, bei dem ein Cantilever mit piezelektrischer Schicht verwendet wird



Spring	Feder
Mass	Masse(-Körper)
piezoelectric trans...	Piezoelektrischer Wandler
Damping	Dämpfung
schock	Stoß

Legende

Aufbau des Energie-Harvesters

Dämpfung Reduzieren der Schwingungsbeschleunigung der Masse

Betriebskomponenten eines Energie-Harvesters

Piezoelectric... Piezoelektrischer Wandler Energieerzeugung mit Hilfe des piezoelektrischen Effekts

ANMERKUNG Ein stoßbetriebener Energie-Harvester wird entsprechend Bild 2 prinzipiell dargestellt. Er besteht aus Massestück, Feder, Dämpfer und piezoelektrischen Wandler. Der piezoelektrische Wandler wird im Allgemeinen als dämpfend dargestellt.

Bild 2 – Prinzipdarstellung des stoßbetriebenen piezoelektrischen Energie-Harvesters

3.1.3

Masse-Feder-Dämpfungs-System

System, das bezüglich des einwirkenden Stoßes reagiert und mechanische Schwingungen im Energie-Harvester unter Nutzung von äquivalenter Masse, Feder und Dämpfung erzeugt

3.1.4

effektive Masse

m

quantitative Kenngröße, die durch die Feder aufgehoben wird, um kinetische Energie wegen der erzeugten Beschleunigung zu haben

3.1.5

Feder

elastisches Objekt, um mechanische Energie mit der Federkonstanten k_{sp} zu speichern

3.1.6

Dämpfung

Effekt, der dazu tendiert, die Beschleunigung des schwingenden Objekts entsprechend des Dämpfungskoeffizienten b_m zu reduzieren

3.2 Piezoelektrischer Wandler

3.2.1

piezoelektrischer Wandler

Energiewandler zur Erzeugung elektrischer Energie aus mechanischer Energie mit Hilfe des piezoelektrischen Effekts

3.2.2

piezoelektrischer Effekt

Effekt, bei dem eine mechanische Deformation des piezoelektrischen Werkstoffs eine proportionale Änderung in der elektrischen Polarisierung dieses Werkstoffs erzeugt

3.2.3

piezoelektrische Konstante

d

quantitative Kenngröße der Polarisierung im piezoelektrischen Werkstoff beim Einwirken einer mechanischen Beanspruchung

3.2.4

elektromechanischer Koppelkoeffizient

k

bestimmter Kennwert der Kombination von elastischer, dielektrischer und piezoelektrischer Konstante, welche natürlich in der mathematischen Beschreibung des piezoelektrischen Wandlers vorkommen. Er beschreibt die Wandlerrate von elektrischer Energie in mechanische Energie und umgekehrt

$$k = \sqrt{\frac{Y_c d}{\varepsilon}} \quad (1)$$

dabei ist Y_c das Elastizitätsmodul (Young-Modul), d die piezoelektrische Konstante und ε die Permittivität der piezoelektrischen Schicht des Energie-Harvesters

3.2.5

Kapazität

C_p

Kapazität zwischen den zwei Elektroden des piezoelektrischen Wandlers

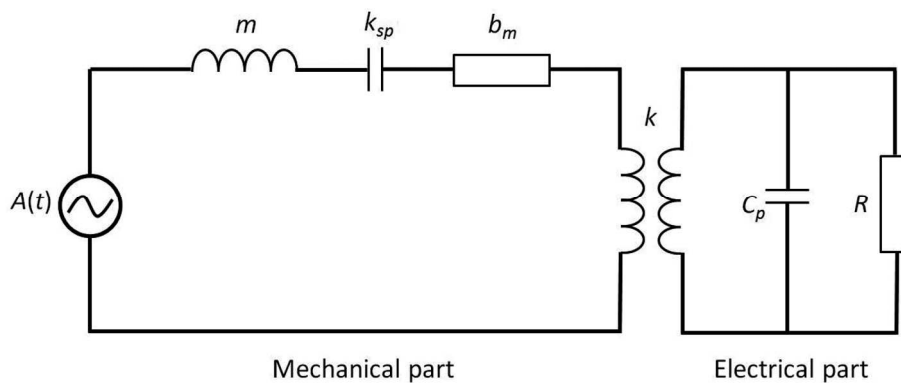
3.3 Wesentliche Kenngrößen

3.3.1

äquivalentes Ersatzschaltbild (des stoßbetriebenen piezoelektrischen Energie-Harvesters)

elektrische Schaltung, welche die gleiche Ausgangsfunktionalität (Spannung, Leistung, usw.) aufweist und zwar bei einem einwirkenden Stoß wie bei dem stoßbetriebenen piezoelektrischen Energie-Harvester

ANMERKUNG Stoßbetriebene piezoelektrische Energie-Harvester können in einen mechanischen und einen elektrischen Teil gegliedert werden, so wie in Bild 3 dargestellt. Der mechanische Bestandteil besteht aus den in Reihe geschalteten Elementen m , k_{sp} , b_m und den Wandler (Koppelement zwischen mechanischen und elektrischen Teil), wobei m die effektive Masse, k_{sp} die Federkonstante und b_m die Dämpfung sind; und der piezoelektrische Effekt zur Wandlung der erzeugten mechanischen Spannung in elektrische Ladungsdichte bei einem Koppelkoeffizienten k . Der elektrische Teil besteht aus den parallel geschalteten C_p , R und dem Wandler, wobei C_p die Kapazität zwischen den zwei Elektroden des Piezowandlers und R der externe Lastwiderstand ist.



mechanical part Mechanischer Teil

electrical part Elektrischer Teil

Legende

Mechanischer Teil

m effective Masse

k_{sp} Federkonstante

b_m Dämpfung

$A(t)$ induzierte Vibration als Antwort auf den einwirkenden Stoß

Elektrischer Teil

C_p Kapazität des piezoelektrischen Wandler

R externe Last

Bild 3 – Äquivalentes Ersatzschaltbild des stoßbetriebenen piezoelektrischen Energie-Harvesters

3.3.2

Eigenfrequenz

ω_n

freie Schwingfrequenz des Masse-Feder-Dämpfungs-Systems des Energie-Harvesters zur Erzeugung der höchsten Ausgangsleistung, die durch folgende Gleichung gegeben ist

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_{sp}}{m}} \quad (2)$$

3.3.3

gedämpfte Schwingung

ω_n

die Frequenz der freien Schwingung des Masse-Feder-Dämpfungssystems des Energie-Harvesters einschließlich einer Dämpfung als Reaktion auf eine Stoßanregung. Sie ist festgelegt als

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (3)$$

dabei ist ζ das Dämpfungsverhältnis, das durch das logarithmische Dekrement der Ausgangsspannungskurve bestimmt wird.

3.3.4

Leerlaufspannung

U

elektrisches Potential des Energie-Harvesters, wenn es keine externe Last gibt, die mit den Anschlüssen des Energie-Harvesters verbunden ist

3.3.5**Ausgangsleistung** P

elektrische Energie, die zu der externen Last, welche mit den Anschlüssen des Energie-Harvesters verbunden ist, übertragen wird

3.3.6**Ausgangsstrom** I

Strom durch die externe Last, die mit den Anschlüssen des Energie-Harvesters verbunden ist

3.3.7**optimale Last** R_{opt}

festgelegter Wert der externen Last, bei der die höchste elektrische Energie vom Energie-Harvester übertragen wird

3.3.8**Temperaturbereich**

Temperaturbereich, so wie er am Gehäuse gemessen wird, bei welcher der Energie-Harvester nicht bleibend geschädigt wird, ausgenommen eines nicht notwendigerweise funktionalen Verhaltens innerhalb festgelegter Toleranzen

3.3.9**Stoßanregungs-Amplitude**

Beschleunigungsamplitude des einwirkenden Stoßes auf den Energie-Harvester, so wie sie am Gehäuse gemessen wird, bei welcher der Energie-Harvester nicht bleibend geschädigt wird, ausgenommen eines nicht notwendigerweise funktionalen Verhaltens innerhalb festgelegter Toleranzen

3.3.10**mittlere Dauer bis zum Ausfall** $MTTF$

Schätzung des Mittelwertes oder mittlere Dauer bis zum ersten Ausfall oder Unterbrechung der Arbeitsweise des Energie-Harvesters

4 Wesentliche Grenzwerte und Kenngrößen**4.1 Kennzeichnung und Bauart**

Stoßbetriebene Energie-Harvester müssen eindeutig und dauerhaft in der u. a. Reihenfolge gekennzeichnet sein:

- a) Jahr und Woche (oder Monat) der Herstellung;
- b) Herstellername oder Schutzmarke;
- c) Anschlusskennzeichnung (optional);
- d) Seriennummer;
- e) Werkscodierung (optional).

4.2 Grenzwerte und Betriebsbedingungen

Der Hersteller muss die Betriebsbedingungen und deren Grenzen für das Energie-Harvesting eindeutig angeben. Ein Grenzwert ist die höchste einwirkende Stoßamplitude, um den Betrieb des Energie-Harvesters zur Energiegewinnung ohne irgendwelche Schäden sicherzustellen

Kenngröße	Symbol	Kleinstwert	Höchstwert	Einheit

4.3 Zusätzliche Angaben

Es sollten einige zusätzliche Informationen angegeben werden, wie z. B. äquivalente Ersatzschaltung (d. h. Eigenfrequenz, Innenimpedanz, Ausgangsspannung und –leistung usw.), Handhabevorschriften, physikalische Informationen (d. h. Bauformabmessungen, Anschlüsse, Zubehör, Betriebsanleitungen usw.), Gehäuseinformationen, PCB-Interface und Ausbauanleitungen sowie andere Informationen usw.

5 Prüfverfahren

5.1 Allgemeines

Im Prinzip werden die Prüfungen für stoßbetriebene Energie-Harvester, so wie in Bild 4 gezeigt, durchgeführt. Nachdem der Energie-Harvester auf eine Prüffassung montiert wurde, wird er mit Hilfe von Spannungs-, Strom- und LCR-Messgeräten gemessen. Da die Eingangsimpedanzen dieser Messgeräte normalerweise 10 M Ω beträgt, sollten miniaturisierte oder mikrometergroße Energie-Harvester wegen ihrer großen Innenimpedanz nicht genau charakterisiert werden. Zum genauen Messen und Charakterisieren dieser Bauelemente sollten Messgeräte mit extrem hohen Impedanzen verwendet werden.

Bevor der Energie-Harvester mit der Prüffassung verbunden wird, müssen Messgeräte, Kabel und der Schwingungsgenerator kalibriert werden. Nach der Kalibrierung sind die Messkabel mit dem in der Prüffassung auf dem Schwingtisch (Schwingungsgenerator) montierten Energie-Harvester zu verbinden. Der Anzeigewert auf dem Display des Messgerätes für die Ausgangsspannung oder –strom ist bei ausgeübtem Stoß, der mit Hilfe eines Beschleunigungsmessgerätes gemessen wird, sorgfältig aufzuzeichnen.