

## 2 Entwicklung von Gleichungen zur Bestimmung der Lebensdauern von Loten bei zyklischen Belastungen

Sowohl auf Basis irreversibler plastischer Dehnungen als auch auf Basis der daraus resultierenden Energiedichten können Ansätze zur Bestimmung von Lebensdauern für Lötverbindungen in der Mikroelektronik formuliert werden.

In diesem Kapitel werden zunächst verschiedene, rein empirische Ansätze zur Lebensdauer vorhersage vorgestellt, die auf *plastischen Dehnungen* beruhen, welche experimentell oder mit Hilfe von Abschätzungsformeln ermittelt werden:

- Wöhlerkurven (Wöhlerversuch, 2009);
- das Coffin-Manson-Gesetz (Coffin, 1954 und Manson, 1954);
- das Coffin-Manson-Gesetz nach Engelmaier (Engelmaier, 1997);
- das Norris-Landzberg-Gesetz für SnPb37 (Norris, Landzberg, 1969);
- das Lau-Pao-Gesetz für SnPb37 und SAC-Lote (Lau, Pao, 1996).

Weiterhin wird das Morrow-Gesetz vorgestellt, welches auf *Kriechenergiedichten* basiert.

Das Coffin-Manson-Gesetz und das Morrow-Gesetz folgen dem Grundprinzip, dass mit Hilfe eines Potenzansatzes ein Zusammenhang zwischen der plastischen Dehnung bzw. der Kriechenergiedichte sowie der Lebensdauer beschrieben wird. Maßgeblich sind hierbei der Exponent des Potenzansatzes und ein passender Koeffizient. Exponenten und Koeffizienten müssen für jedes zu untersuchende Material separat ermittelt werden und vorliegen.

Für das Coffin-Manson-Gesetz können Exponenten und Koeffizienten einerseits rein empirisch, andererseits aber auch mit Hilfe von Kriechdehnungen ermittelt werden, die aus FE-Simulationen stammen. In beiden Fällen ist es jedoch nötig, Lebensdauern der zu untersuchenden Lötverbindungen experimentell zu ermitteln.

Zur Bestimmung von Exponenten und Koeffizienten des Morrow-Gesetzes sind grundsätzlich experimentell ermittelte Lebensdauern und per FE-Simulation ermittelte Kriechenergiedichten notwendig.

Beide Gesetze ermöglichen vergleichsweise gute Lebensdauerprognosen der zu untersuchenden Lötverbindungen. Trotz der mathematischen Einfachheit der Gesetze sind die zu Grunde liegenden Daten sehr komplex, insbesondere, wenn FE-Simulationen durchgeführt werden. Im letzteren Fall sind u. a. folgende Einflussgrößen enthalten:

- die genauen Geometrien der Lötverbindung und der Komponenten in der Umgebung der Lötverbindung;
- genaue Materialdaten;
- exakt definierbare Temperaturwechseltests und deren Auswirkungen.

Weiterhin erlauben FE-Simulationen die Möglichkeit, nur ausgewählte, hoch belastete Stellen einer zu untersuchenden Lötverbindung zur Auswertung zu nutzen.

Im letzten Teil dieses Kapitels wird die Arbeit *A dislocation model of low-cycle fatigue damage and derivation of the Coffin-Manson equation* von Huang et al., 1992, ausführlich vorgestellt. In dieser Arbeit werden mathematische Beziehungen zwischen den Coffin-Manson- und Morrow-Exponenten und -Koeffizienten und den Parametern des Potenzansatzes nach Ramberg und Osgood, 1943 hergeleitet. Hierdurch ist es prinzipiell möglich, (plastische) Spannungs-Dehnungskurven eines Materials vorherzusagen, wenn die Coffin-Manson- und Morrow-Exponenten und -Koeffizienten bekannt sind.

## 2.1 Wöhlerkurven

Ermüdungsschädigungen werden allgemein durch extern aufgeprägte Wechsellasten hervorgerufen. Derartige Belastungen verursachen alternierende Spannungen und Dehnungen, die nach einer gewissen Zeit zunächst zur Rissbildung und dann zum Bauteilversagen führen können.

Zur Untersuchung dieser Auswirkungen werden gewöhnlicherweise standardisierte Lastwechseltests, die jeweils aus vordefinierten Abfolgen von Lastspielen bestehen, verwendet.

Da jedoch mechanische oder thermische Belastungen, die in der Realität auftreten, oftmals komplizierte und völlig unterschiedliche zeitliche Verläufe besitzen, wären allgemeingültige, repräsentative und reproduzierbare Lastwechseltests nur mit sehr großem Aufwand zu erstellen und durchzuführen. Weiterhin wäre die Übertragbarkeit der Testergebnisse auf andere Bauteile stark eingeschränkt.

Aus den genannten Gründen werden meistens vereinfachte Lastwechseltests zur Untersuchung von wechselnd beanspruchten Werkstoffen oder Bauteilen verwendet, die oftmals sinus- oder dreieckförmige Verläufe aufweisen. Derartige Tests werden entweder spannungs- oder dehnungsgesteuert durchgeführt. Abb. 2.1 stellt eine sinusförmige, spannungsgesteuerte Beanspruchung um eine konstante Mittellast dar.

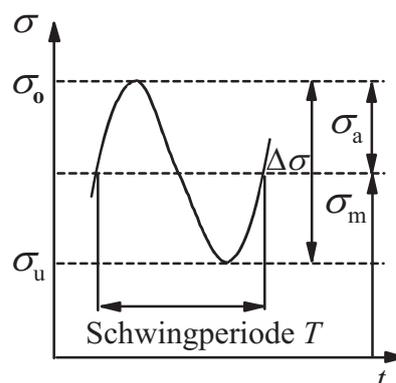


Abb. 2.1: Zeitlicher Verlauf der Spannung bei schwingender Beanspruchung (Mauk et al., 2008)

Die höchste auftretende Spannung ist die Oberspannung  $\sigma_o$ , die niedrigste auftretende Spannung ist die Unterspannung  $\sigma_u$ .

Für die Spannungsamplitude gilt:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{2}, \quad (2.1)$$

die Mittelspannung ist definiert durch:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_o + \sigma_u}{2}. \quad (2.2)$$

Das Spannungsverhältnis aus Ober- und Unterspannung wird ebenfalls in einem Parameter erfasst:

$$R_\sigma = \frac{\sigma_u}{\sigma_o}. \quad (2.3)$$

Analog hierzu werden folgende Kenngrößen bei dehnungsgesteuerten Schädigungsversuchen definiert:

- die Oberdehnung  $\varepsilon_o$  ;
- die Unterdehnung  $\varepsilon_u$  ;
- die Dehnungsamplitude  $\varepsilon_a = (\varepsilon_o - \varepsilon_u)/2$  ;
- die Mitteldehnung  $\varepsilon_m = (\varepsilon_o + \varepsilon_u)/2$  ;
- das Dehnungsverhältnis  $R_\varepsilon = \varepsilon_u/\varepsilon_o$  .

Innerhalb einer Schwingungsperiode wird ein Lastspiel durchlaufen. Die Anzahl der durchlaufenden Lastspiele wird als Lastspiel-, Lastwechsel- oder Zyklenzahl  $N$  bezeichnet.

Je nach Lage der Ober- und der Unterspannung werden bei spannungsgesteuerten Versuchen folgende Beanspruchungsfälle unterschieden:

- Beanspruchungen im Zugschwellbereich  $\sigma_u \geq 0$  (Fälle a, b in Abb. 2.2);
- Beanspruchungen im Wechselbereich,  $\sigma_u \leq 0$ ,  $\sigma_o \geq 0$  (Fälle c, d, e);
- Beanspruchungen im Druckschwellbereich,  $\sigma_o \leq 0$  (Fälle f, g).

Folgende Sonderfälle sind hierbei enthalten:

- die reine Zugschwellbeanspruchung:  $\sigma_u = 0$ ,  $R_\sigma = 0$  (Fall b);
- die reine Wechselbeanspruchung:  $\sigma_u = -\sigma_o$ ,  $R_\sigma = -1$  (Fall d);
- die reine Druckschwellbeanspruchung:  $\sigma_o = 0$ ,  $R_\sigma = -\infty$  (Fall f).

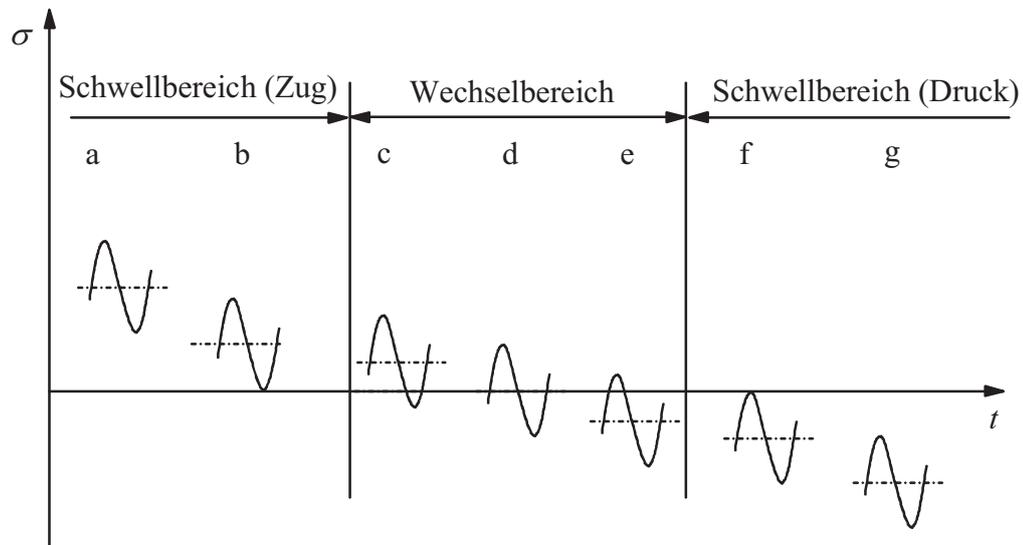


Abb. 2.2: Belastungsfälle

Der Dehnungsausschlag, der sich während eines spannungsgesteuerten Lastspiels einstellt, hängt vom Werkstoffverhalten ab. Abb. 2.3 stellt eine Spannungs-Dehnungs-Hysterese (Mauk et al., 2008) dar, die jeweils bis in den plastischen Bereich hineinreicht.

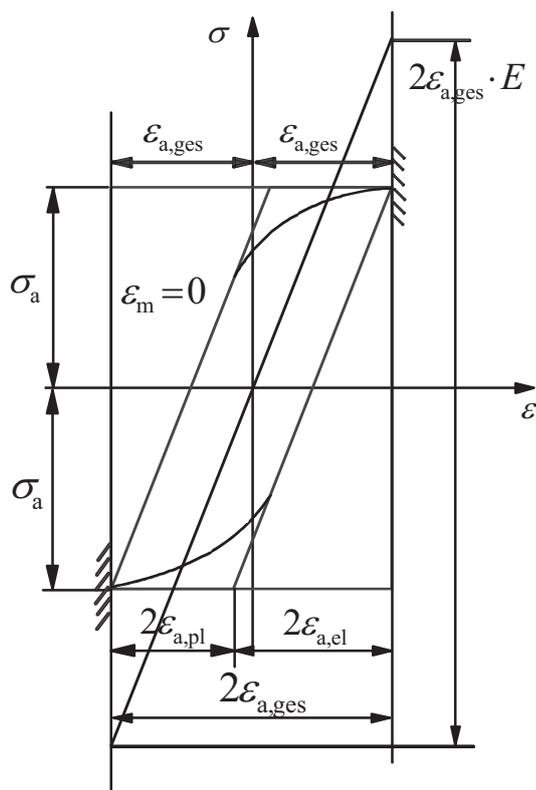


Abb. 2.3: Spannungs-Dehnungs-Hysterese für einen Belastungszyklus im Zeitfestigkeitsbereich

In Lastwechseltests werden die metallischen Werkstoffe wiederholten Lastspielen unterzogen. Die Testproben können, je nach angelegter Spannungsamplitude, verschiedenen Anzahlen von Lastzyklen standhalten.

Auch Spannungen unterhalb der Streckgrenze führen nach gewissen Anzahlen von Lastspielen zum Versagen des untersuchten Bauteils. Hierbei ist der Begriff des Versagens vorher zu

definieren. Versagen kann u. a. die Zerteilung eines Bauteils durch einen Bruch bezeichnen, oder aber die Reduktion des tragenden/leitenden Querschnitts auf einen zu definierenden Prozentwert.

Die Anzahl an Lastzyklen bis zum Versagen wird, entsprechend dieser Definition, als Bruchschwingspielzahl, Lebensdauer oder Lebenszyklus bezeichnet.

Zur Vorhersage von Bruchschwingspielzahlen dienen Wöhlerkurven. Wöhlerkurven basieren auf empirisch ermittelten Bezugspunkten. Ein Bezugspunkt ist ein Wertepaar bestehend aus einer Spannungsamplitude  $\sigma_a$  und einer ermittelten Bruchschwingspielzahl  $N_b$ .

Um einen Bezugspunkt zu erhalten, werden ca. sechs bis zehn Proben des gleichen Werkstoffes mit derselben Spannungsamplitude bis zum Bruch belastet. Der Bezugspunkt ergibt sich aus der Mittelung der sechs bis zehn erhaltenen Bruchschwingspielzahlen  $N_b$  und der zugehörigen Spannungsamplitude  $\sigma_a$ . Bei allen ermittelten Bezugspunkten ist die Mittelspannung  $\sigma_m$  konstant.

Die ermittelten Bezugspunkte werden in ein doppellogarithmisches Diagramm eingetragen, die Bruchschwingspielzahlen auf der Abszisse und die zugehörigen Spannungsamplituden auf der Ordinate. Zuletzt werden die Bezugspunkte durch eine Regressionsgerade dargestellt. Abb. 2.4 veranschaulicht beispielhaft eine Wöhlerkurve (Mauk et al., 2008).

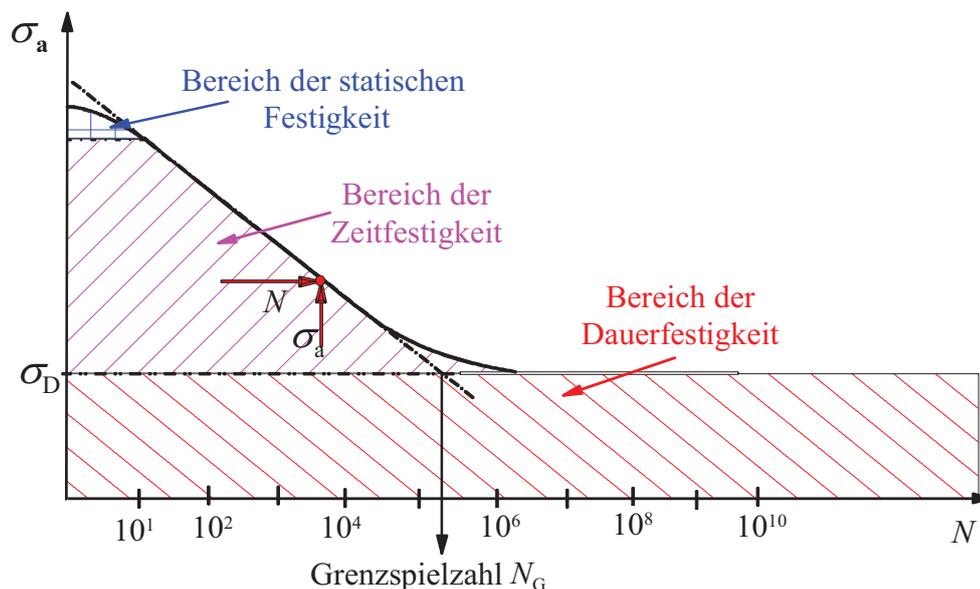


Abb. 2.4: Idealisierte Versagenskennlinie bzw. Wöhlerkurve

Man unterscheidet in einer Wöhlerkurve drei Bereiche, wie in Abb. 2.4 gezeigt wird:

- Der Bereich der *statischen Festigkeit* (ca.  $1 < N < 10^1$ ): Bauteile, deren zu erwartende Lebensdauer unter  $10^1$  liegt, werden statisch dimensioniert, entsprechend einer ruhenden Beanspruchung.
- Der *Zeitfestigkeitsbereich* (ca.  $10^1 < N < N_G$ ): Je nach wirkender Spannungsamplitude ertragen die Bauteile verschiedene Anzahlen an Lastspielen.
- Oberhalb der sogenannten Grenzlastspielzahl  $N_G$  ( $N > N_G$ ) und unterhalb der Dauerfestigkeit  $\sigma_D$  liegt per definitionem der *Dauerfestigkeitsbereich* vor. Bauteile, die mit

Spannungsamplituden unterhalb  $\sigma_D$  beansprucht werden, werden als dauerhaft erachtet.

Bei klassischen Ingenieurmetallen liegt die Grenzlastspielzahl in der Größenordnung von ca.  $10^7$  Lastspielen. Um Streuungen von Materialeigenschaften berücksichtigen zu können, existieren wahrscheinlichkeitsabhängige Wöhlerlinien. In Abb. 2.5 werden derartige Wöhlerlinien gezeigt, hierbei bezeichnet die Größe  $P_A$  jeweils die Ausfallwahrscheinlichkeit bei der Durchführung eines Versuches. Gewöhnlicherweise werden Abstufungen bei 10 %, 50 % und 90 % vorgenommen.

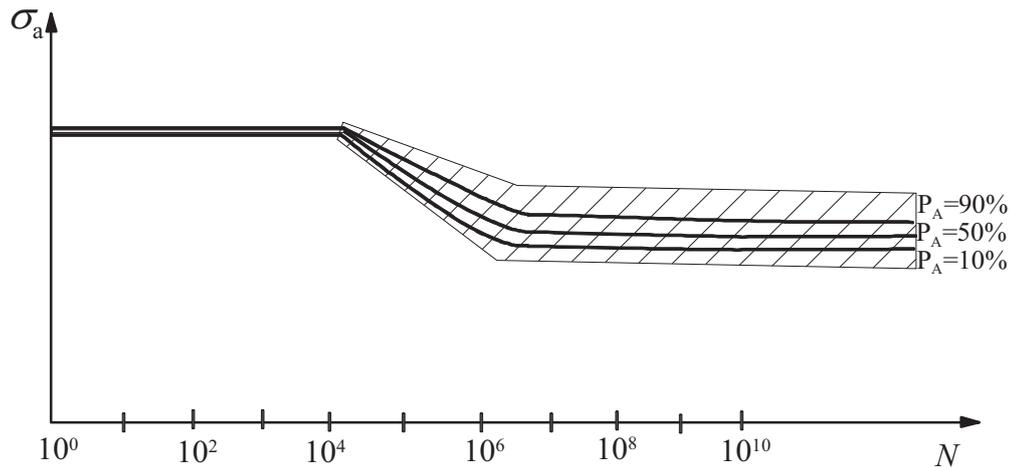


Abb. 2.5: Streubereich einer Wöhlerkurve

Zur mathematischen Beschreibung der Abhängigkeit der Bruchschwingungszahl von der Spannungsamplitude werden Wöhlerlinien in verschiedener Art und Weise durch Formeln ausgedrückt.

Bei Spannungen oberhalb der Dauerfestigkeit, also im Zeitfestigkeitsbereich, versagt die Probe nach endlichen Anzahlen von Zyklen. Die Anzahlen nehmen erwartungsgemäß mit steigenden Spannungsamplituden ab. Bei den meisten Werkstoffen existiert ein Zusammenhang zwischen Spannungsamplitude und Bruchschwingungszahl, der durch ein Potenzgesetz in folgender Form beschrieben werden kann:

$$\sigma_a = C_1 \cdot N_f^{-a} \quad (2.4)$$

Diese Beziehung wird *Basquin-Gleichung* (Basquin, 1910) genannt und ergibt in einem doppellogarithmischen Wöhlerdiagramm eine Gerade. Die Größe  $a$  wird als Schwingfestigkeitsexponent bezeichnet und liegt für die meisten Werkstoffe zwischen 0,05 und 0,12 (Harders, 2005), (Dieter, 1988).  $C_1$  ist eine Materialkonstante,  $N_f$  ist die Bruchschwingungszahl.

Die Basquin-Gleichung findet meistens bei großen Zyklenzahlen ab ca.  $10^4$  Verwendung. Der Bereich zwischen  $10^4$  Lastspielen und der Grenzlastspielzahl wird als HCF-Bereich (*high cycle fatigue*) bezeichnet.

Bei großen Spannungsamplituden spielen plastische Verformungen eine wichtige Rolle. Entsprechend verändert sich die zu erwartende Bruchschwingungszahl empfindlich mit Veränderungen der Spannung. Der Abfall der Wöhlerlinie ist somit bei großen Spannungen

und kleinen Bruchschwingspielzahlen unterhalb  $10^4$  am stärksten, was besonders deutlich wird, wenn die Darstellung nicht doppellogarithmisch, sondern absolut erfolgt. Der Bereich unterhalb von  $10^4$  Lastspielen wird LCF-Bereich (*low cycle fatigue*) genannt.

Häufig werden aufgrund der beschriebenen Sensibilität der zu erwartenden Bruchschwingspielzahl gegenüber Veränderungen der Spannungsamplitude die Wöhlerlinien im LCF-Bereich mit Hilfe von dehnungsgesteuerten Versuchen ermittelt. Derartige Wöhlerlinien zeigen somit die Bruchschwingspielzahlen  $N_f$  über den Dehnungsamplituden  $\varepsilon_a$ , hierbei steht der Index a für Amplitude.

Bei geringen Bruchschwingspielzahlen dominiert der plastische Anteil  $\varepsilon_a^{\text{pl}}$ . Abb. 2.6 zeigt beispielhaft Dehnungswöhlerlinien in Abhängigkeit der elastischen und der plastischen Dehnungen. Die Wöhlerlinien können im doppellogarithmischen Maßstab mit zwei Geraden angenähert werden.

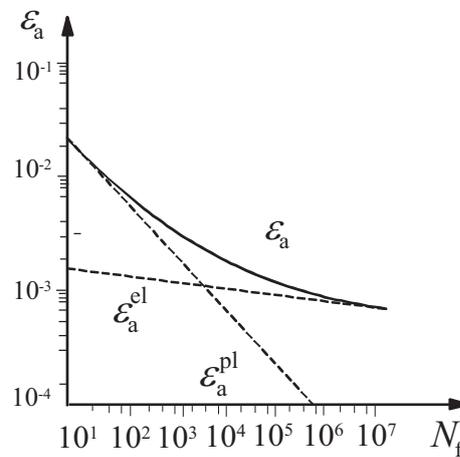


Abb. 2.6: Dehnungswöhlerkurve

Zur mathematischen Beschreibung der plastischen Dehnungswöhlerlinie hat sich die *Coffin-Manson-Gleichung* (Coffin, 1954 und Manson, 1954) durchgesetzt<sup>6</sup>:

$$\varepsilon_a^{\text{pl}} = C_2 N_f^{\frac{1}{B}}, \text{ mit:} \quad (2.5)$$

$\varepsilon_a^{\text{pl}}$ : plastische Dehnungsamplitude,

$C_2$ : Materialkonstante,

$N_f$ : Bruchschwingspielzahl,

$1/B$ : materialabhängiger Schädigungsexponent.

Die in Abb. 2.6 dargestellte Gerade, die den elastischen Anteil der Dehnung darstellt, ist hingegen bei kleinen Lasten und somit höheren Lastspielzahlen maßgebend. Der elastische Dehnungsanteil wird wiederum mit Hilfe der Basquin-Gleichung beschrieben:

<sup>6</sup> Anmerkung: Der Exponent  $\frac{1}{B}$  wird in der Literaturquelle mit  $n$  oder  $b$  bezeichnet.