

DIN 50100

ICS 19.060; 77.040.10

Ersatz für
DIN 50100:2016-12**Schwingfestigkeitsversuch –
Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter
Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile**

Load controlled fatigue testing –
Execution and evaluation of cyclic tests at constant load amplitudes on metallic specimens
and components

Essai de fatigue –
Réalisation et évaluation des essais cycliques avec une amplitude de charge constante pour
des échantillons de matériaux et de composants métalliques

Gesamtumfang 114 Seiten

DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP)

Inhalt

	Seite
Vorwort	7
Einleitung	8
1 Anwendungsbereich	9
2 Normative Verweisungen	9
3 Begriffe	9
4 Formelzeichen und Abkürzungen	10
4.1 Formelzeichen	10
4.2 Abkürzungen	14
5 Wöhlerlinie	14
6 Lastgrößen	19
7 Probenform und Probenfertigung	22
8 Prüftechnik	24
9 Versuchsdurchführung	25
9.1 Allgemeines	25
9.2 Zeitfestigkeit	25
9.2.1 Allgemeines	25
9.2.2 Perlenschnurverfahren	28
9.2.3 Horizontenverfahren	36
9.3 Langzeitfestigkeit	44
9.3.1 Allgemeines	44
9.3.2 Treppenstufenverfahren	47
10 Versuchsauswertung	53
10.1 Allgemeines	53
10.2 Zeitfestigkeit	54
10.2.1 Allgemeines	54
10.2.2 Perlenschnurverfahren	54
10.2.3 Horizontenverfahren	57
10.3 Auswertung Langzeitfestigkeit	59
10.3.1 Allgemeines	59
10.3.2 Auswertung Treppenstufenverfahren	59
10.4 Knick-Schwingspielzahl und Verlauf der Wöhlerlinie im Langzeitfestigkeitsbereich . . .	62
10.5 Wöhlerlinie für eine von 50 % abweichende Ausfallwahrscheinlichkeit	62
11 Dokumentation	63
11.1 Allgemeines	63
11.2 Werkstoff	64
11.3 Versuchskörper (Werkstoffprobe oder Bauteil)	64
11.4 Versuchsaufbau	64
11.5 Versuchsdurchführung	65
11.6 Versuchsauswertung	65
11.7 Wöhler-Diagramm	66
Anhang A (normativ) Perlenschnurverfahren: Bestimmung des erforderlichen Stichprobenumfangs	67
A.1 Perlenschnurverfahren: Erforderliche Anzahl von Proben zur Abschätzung der mittleren Schwingspielzahl	67
A.2 Perlenschnurverfahren: Erforderliche Anzahl von Proben zur Abschätzung der Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden	73
Anhang B (normativ) Horizontenverfahren: Bestimmung des erforderlichen Stichprobenumfangs	78
B.1 Horizontenverfahren: Erforderliche Anzahl von Proben der gesamten Versuchsreihe zur Abschätzung der mittleren Schwingspielzahl	78
B.2 Horizontenverfahren: Erforderliche Anzahl von Proben der gesamten Versuchsreihe zur Abschätzung der Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden	84

Anhang C (informativ) Typische Standardabweichungen im Zeitfestigkeitsbereich	89
Anhang D (informativ) Beispiele Versuchsprotokolle	90
D.1 Beispiele Versuchsprotokolle	90
D.1.1 Allgemeines	90
D.1.2 Protokoll Versuchsreihe Zeitfestigkeit	91
D.1.3 Protokoll Versuchsreihe Langzeitfestigkeit	92
Anhang E (normativ) Beispiele für Versuchsauswertungen	93
E.1 Beispiel: Auswertung Zeitfestigkeitsgerade Perlenschnurverfahren	93
E.1.1 Versuchsergebnisse	93
E.1.2 Lage und Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden	93
E.1.3 Zeitfestigkeitsgerade für eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 50 %	94
E.1.4 Standardabweichung der Versuchsergebnisse	95
E.1.5 Zeitfestigkeitsgerade für eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 10 %	96
E.1.6 Zeitfestigkeitsgerade für eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 90 %	96
E.1.7 Grafische Darstellung der Zeitfestigkeitsgeraden	97
E.2 Beispiel: Auswertung Zeitfestigkeitsgerade Horizontenverfahren	98
E.2.1 Versuchsergebnisse	98
E.2.2 Mittelwert und Standardabweichung Lasthorizont 1	99
E.2.3 Mittelwert und Standardabweichung Lasthorizont 2	99
E.2.4 Zeitfestigkeitsgerade für eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 50 %	100
E.2.5 Wöhlerlinie für eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 10 %	101
E.2.6 Zeitfestigkeitsgerade für eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 90 %	101
E.2.7 Grafische Darstellung der Zeitfestigkeitsgerade	101
E.3 Beispiel: Auswertung Langzeitfestigkeit Treppenstufenverfahren	102
E.4 Beispiel: Ermittlung der Knick-Schwingspielzahl und Verlauf der Wöhlerlinien bis zur Grenzschwingspielzahl	105
E.4.1 Perlenschnurverfahren	105
E.4.2 Horizontenverfahren	106
E.5 Beispiel: Grafische Darstellung der Wöhlerlinie	108
E.5.1 Perlenschnurverfahren	108
E.5.2 Horizontenverfahren	111
Literaturhinweise	113

Bilder

Bild 1 — Wöhlerdiagramm (schematisch)	17
Bild 2 — Wöhlerdiagramm im Bereich hoher Schwingspielzahlen (schematisch)	18
Bild 3 — Beispiel für die Darstellung von Versuchsergebnissen im Zeit- und Langzeitfestigkeitsbereich	19
Bild 4 — Last-Zeit-Verlauf im Schwingfestigkeitsversuch (schematisch)	20
Bild 5 — Benennung der Last in Abhängigkeit vom Mittelwert L_m	22
Bild 6 — Ermittlung der Streuspannen für Mittelwert und Standardabweichung durch Auswertung einer großen Anzahl von Stichproben aus Monte-Carlo-Simulationen	26
Bild 7 — Abschätzen des Mittelwerts der Grundgesamtheit auf der Basis einer Stichprobe	27
Bild 8 — Wöhlerdiagramm (schematisch), Perlenschnurverfahren	29
Bild 9 — Perlenschnurverfahren, erforderliche Probenanzahl zur Schätzung des Mittelwertes $N_{50\%,GG}$ (Ergebnisse aus je 20 000 Simulationen je Probenanzahl)	32
Bild 10 — Perlenschnurverfahren, erforderliche Probenanzahl zur Schätzung der Standardabweichung $s_{lgN,GG}$ (Ergebnisse aus je 20 000 Simulationen je Probenanzahl)	34
Bild 11 — Perlenschnurverfahren, erforderliche Probenanzahl zur Schätzung der Wöhlerlinienneigung (Ergebnisse aus je 20 000 Simulationen je Probenanzahl)	36
Bild 12 — Wöhlerdiagramm (schematisch), Horizontenverfahren	37
Bild 13 — Erforderliche Anzahl von Proben in Abhängigkeit von der geforderten Streuspanne T_m und dem erwarteten Verhältnis der	

Schwingspielzahlen $N_{50\%,La,2}/N_{50\%,La,1}$ auf dem oberen und unteren Lasthorizont (Ergebnisse aus je 20 000 Simulationen je Probenanzahl)	40
Bild 14 — Horizontenverfahren, erforderliche Anzahl von Proben zur Schätzung der Standardabweichung $s_{lgN,GG}$ (Ergebnisse aus je 20 000 Simulationen je Probenanzahl) .	42
Bild 15 — Horizontenverfahren, erforderliche Probenanzahl zur Schätzung der Wöhlerlinienneigung k_{GG} (Ergebnisse aus je 20 000 Simulationen je Probenanzahl) . . .	44
Bild 16 — Ermittlung der Streuspannen für Mittelwert und Standardabweichung durch Auswertung einer großen Anzahl von Stichproben aus Monte-Carlo-Simulationen	45
Bild 17 — Abschätzen des Mittelwerts der Grundgesamtheit auf der Basis einer Stichprobe . . .	46
Bild 18 — Folge im Treppenstufenverfahren	48
Bild 19 — Treppenstufenverfahren, erforderliche Anzahl von Proben zur Schätzung der Langzeitfestigkeit $L_{aL,NG,GG}$ (Ergebnisse aus je 20 000 Simulationen je Probenanzahl) .	51
Bild 20 — Treppenstufenverfahren, erforderliche Anzahl von Proben zur Schätzung der Standardabweichung s_{lgL} der Langzeitfestigkeit (Ergebnisse aus je 20 000 Simulationen je Probenanzahl)	53
Bild 21 — Standardabweichung in Schwingspielzahl- bzw. Lastrichtung (schematisch)	54
Bild 22 — Ergebnisse der Versuchsdurchführung Perlenschnurverfahren (schematisch)	55
Bild 23 — Verschieben der Versuchsergebnisse auf einen gemeinsamen Lasthorizont (schematisch)	56
Bild 24 — Berechnung der Zeitfestigkeitsgerade aus zwei Lasthorizonten (schematisch)	58
Bild 25 — Treppenstufenfolge und Ermittlung der Kennziffern für die Auswertung	60
Bild 26 — Abschätzung der Standardabweichung s_{lgL} in Abhängigkeit von der Hilfsgröße D_T , dem Stufensprung d_{lg} und der Anzahl der Versuche n	61
Bild E.1 — Wöhlerdiagramm, grafische Darstellung der Zeitfestigkeitsgerade	98
Bild E.2 — Wöhlerdiagramm, grafische Darstellung der Zeitfestigkeitsgerade	102
Bild E.3 — Wöhlerdiagramm Typ I, grafische Darstellung der Versuchsergebnisse und der statistischen Auswertung	109
Bild E.4 — Wöhlerdiagramm Typ II, grafische Darstellung der Versuchsergebnisse und der statistischen Auswertung	110
Bild E.5 — Wöhlerdiagramm Typ I, grafische Darstellung der Versuchsergebnisse und der statistischen Auswertung	111
Bild E.6 — Wöhlerdiagramm Typ II, grafische Darstellung der Versuchsergebnisse und der statistischen Auswertung	112

Tabellen

Tabelle 1 — Formelzeichen und ihre Bedeutung	10
Tabelle 2 — Perlenschnurverfahren, erforderliche Anzahl von Proben zur Schätzung des Mittelwertes $N_{50\%,GG}$ unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,20$ der Grundgesamtheit	31
Tabelle 3 — Perlenschnurverfahren, erforderliche Anzahl von Proben zur Schätzung der Standardabweichung $s_{lgN,GG}$	33
Tabelle 4 — Perlenschnurverfahren, erforderliche Anzahl von Proben zur Schätzung der Neigung der Wöhlerlinie k_{GG} unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,20$ der Grundgesamtheit	35
Tabelle 5 — Horizontenverfahren, erforderliche Anzahl von Proben zur Schätzung des Mittelwertes $N_{50\%,GG}$ unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,20$ der Grundgesamtheit	39
Tabelle 6 — Horizontenverfahren, erforderliche Anzahl von Proben zur Schätzung der Standardabweichung $s_{lgN,GG}$	41
Tabelle 7 — Horizontenverfahren, erforderliche Anzahl von Proben zur Schätzung der Neigung der Wöhlerlinie k_{GG} unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,20$ der Grundgesamtheit	43

Tabelle 8 — Standardabweichung der Grundgesamtheit und Stufensprung für das Treppenstufenverfahren	48
Tabelle 9 — Treppenstufenverfahren, erforderliche Probenanzahl zur Schätzung der Langzeitfestigkeit $L_{aL,NG,GG}$	50
Tabelle 10 — Treppenstufenverfahren, erforderliche Anzahl von Proben zur Schätzung der Standardabweichung s_{lgL} der Langzeitfestigkeit	52
Tabelle 11 — Quantil u zur Berechnung unterschiedlicher Ausfallwahrscheinlichkeiten P_A unter der Annahme einer lg-Normalverteilung	63
Tabelle A.1 — Perlenschnurverfahren — Erforderliche Anzahl von Proben zur Schätzung des Mittelwertes $N_{50\%,GG}$ unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,10$ der Grundgesamtheit	68
Tabelle A.2 — Perlenschnurverfahren — Erforderliche Anzahl von Proben zur Schätzung des Mittelwertes $N_{50\%,GG}$ unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,15$ der Grundgesamtheit	69
Tabelle A.3 — Perlenschnurverfahren — Erforderliche Anzahl von Proben zur Schätzung des Mittelwertes $N_{50\%,GG}$ unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,20$ der Grundgesamtheit	70
Tabelle A.4 — Perlenschnurverfahren — Erforderliche Anzahl von Proben zur Schätzung des Mittelwertes $N_{50\%,GG}$ unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,25$ der Grundgesamtheit	71
Tabelle A.5 — Perlenschnurverfahren — Erforderliche Anzahl von Proben zur Schätzung des Mittelwertes $N_{50\%,GG}$ unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,30$ der Grundgesamtheit	72
Tabelle A.6 — Perlenschnurverfahren — erforderliche Anzahl von Proben zur Schätzung der Neigung der Wöhlerlinie k_{GG} unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,10$ der Grundgesamtheit	73
Tabelle A.7 — Perlenschnurverfahren — erforderliche Anzahl von Proben zur Schätzung der Neigung der Wöhlerlinie k_{GG} unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,15$ der Grundgesamtheit	74
Tabelle A.8 — Perlenschnurverfahren — erforderliche Anzahl von Proben zur Schätzung der Neigung der Wöhlerlinie k_{GG} unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,20$ der Grundgesamtheit	75
Tabelle A.9 — Perlenschnurverfahren — erforderliche Anzahl von Proben zur Schätzung der Neigung der Wöhlerlinie k_{GG} unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,25$ der Grundgesamtheit	76
Tabelle A.10 — Perlenschnurverfahren — erforderliche Anzahl von Proben zur Schätzung der Neigung der Wöhlerlinie k_{GG} unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,30$ der Grundgesamtheit	77
Tabelle B.1 — Horizontenverfahren — erforderliche Anzahl von Proben der gesamten Versuchsreihe zur Schätzung des Mittelwertes $N_{50\%,GG}$ unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,10$ der Grundgesamtheit	79
Tabelle B.2 — Horizontenverfahren — erforderliche Anzahl von Proben der gesamten Versuchsreihe zur Schätzung des Mittelwertes $N_{50\%,GG}$ unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,15$ der Grundgesamtheit	80
Tabelle B.3 — Horizontenverfahren — erforderliche Anzahl von Proben der gesamten Versuchsreihe zur Schätzung des Mittelwertes $N_{50\%,GG}$ unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,20$ der Grundgesamtheit	81
Tabelle B.4 — Horizontenverfahren — erforderliche Anzahl von Proben der gesamten Versuchsreihe zur Schätzung des Mittelwertes $N_{50\%,GG}$ unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,25$ der Grundgesamtheit	82
Tabelle B.5 — Horizontenverfahren — erforderliche Anzahl von Proben der gesamten Versuchsreihe zur Schätzung des Mittelwertes $N_{50\%,GG}$ unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,30$ der Grundgesamtheit	83
Tabelle B.6 — Horizontenverfahren — erforderliche Anzahl von Proben der gesamten Versuchsreihe zur Schätzung der Neigung der Wöhlerlinie k_{GG} unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,10$ der Grundgesamtheit	84

Tabelle B.7 — Horizontenverfahren — erforderliche Anzahl von Proben der gesamten Versuchsreihe zur Schätzung der Neigung der Wöhlerlinie k_{GG} unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,15$ der Grundgesamtheit	85
Tabelle B.8 — Horizontenverfahren — erforderliche Anzahl von Proben der gesamten Versuchsreihe zur Schätzung der Neigung der Wöhlerlinie k_{GG} unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,20$ der Grundgesamtheit	86
Tabelle B.9 — Horizontenverfahren — erforderliche Anzahl von Proben der gesamten Versuchsreihe zur Schätzung der Neigung der Wöhlerlinie k_{GG} unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,25$ der Grundgesamtheit	87
Tabelle B.10 — Horizontenverfahren — erforderliche Anzahl von Proben der gesamten Versuchsreihe zur Schätzung der Neigung der Wöhlerlinie k_{GG} unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,30$ der Grundgesamtheit	88
Tabelle C.1 — Typische Standardabweichungen im Zeitfestigkeitsbereich aus einer großen Anzahl von Stichproben	89
Tabelle E.1 — Versuchsergebnisse Perlenschnurverfahren	93
Tabelle E.2 — Summenbildung für Regressionsrechnung	94
Tabelle E.3 — Verschieben der Versuchsergebnisse auf gemeinsamen, fiktiven Lasthorizont	95
Tabelle E.4 — Versuchsergebnisse Horizontenverfahren	98
Tabelle E.5 — Aufbereitung der Versuchsergebnisse Horizont $L_{a1} = 470$ MPa	99
Tabelle E.6 — Aufbereitung der Versuchsergebnisse Horizont $L_{a2} = 330$ MPa	100
Tabelle E.7 — Treppenstufenfolge	102
Tabelle E.8 — Stützstellen der Wöhlerlinie Perlenschnurverfahren, Wöhlerlinie Typ I	108
Tabelle E.9 — Stützstellen der Wöhlerlinie Perlenschnurverfahren, Wöhlerlinie Typ II	110
Tabelle E.10 — Stützstellen der Wöhlerlinie Horizontenverfahren, Wöhlerlinie Typ I	111
Tabelle E.11 — Stützstellen der Wöhlerlinie Horizontenverfahren, Wöhlerlinie Typ II	112

Vorwort

Dieses Dokument wurde vom Arbeitsausschuss NA 062-01-45 AA „Ermüdungsprüfung“ im DIN-Normenausschuss Materialprüfung (NMP) erarbeitet.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. DIN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber DIN 50100:2016-12 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Aussagen zur zulässigen Erwärmung der Probe durch den Versuch und die Messung der Proben temperatur wurden präzisiert;
- b) für die Auswahl der Versuchsergebnisse, die für die Berechnung der Zeitfestigkeitsgerade verwendet werden, wurde ein Kriterium eingeführt;
- c) für den Fall, dass im Treppenstufenverfahren nur zwei Lasthorizonte mit jeweils ausschließlich Brüchen oder Durchläufern belegt sind, wurde eine Vorgehensweise zum Einfügen einer neuen Laststufe beschrieben;
- d) orthografische und Vorzeichenfehler wurden korrigiert;
- e) Dokument wurde redaktionell überarbeitet.

Frühere Ausgaben

DIN 50100: 1942-07, 1953-01, 1978-02, 2016-12

Einleitung

Der Wöhlerversuch ist nach August Wöhler benannt. August Wöhler (1819–1914) war unter anderem Leiter der Central-Werkstatt der Niederschlesisch-Märkischen Eisenbahn zu Frankfurt a. d. Oder. Er entwickelte Maschinen zur Prüfung von Bauteilen für verschiedene Belastungsarten sowie Methoden zur Messung von Betriebsverformungen. Wöhler erkannte anhand seiner Versuchsergebnisse das Phänomen, dass unter zyklischer Belastung die Werkstofffestigkeit deutlich niedriger ist als die Zugfestigkeit und dachte bereits an eine zeitfeste Bemessung von Bauteilen.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt Anforderungen an den Schwingfestigkeitsversuch fest, der zur Ermittlung von Kennwerten dient, die das Verhalten metallischer Werkstoffe und Bauteile bei zyklischer Beanspruchung mit einer konstanten Amplitude beschreiben (Wöhlerversuch).

Dieses Dokument umfasst die Versuchsdurchführung, die Versuchsauswertung sowie die Dokumentation von lastgeregelten Versuchen im Zeit- und Langzeitfestigkeitsbereich zwischen 10^4 Schwingspielen und 10^7 Schwingspielen. Die Extrapolation von Wöhlerlinien über den experimentell belegten Bereich hinaus, insbesondere für Wöhlerlinien vom Typ III (siehe Abschnitt 5), ist nicht Bestandteil dieses Dokuments. In diesem Dokument wird eine Wöhlerlinie mit 50 % Ausfallwahrscheinlichkeit angegeben sowie Wöhlerlinien innerhalb einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 10 % und 90 %.

In dieser Norm wird ausschließlich die logarithmische Normalverteilung zur Auswertung der Versuchsergebnisse eingesetzt.

Dehnungs- oder schiebungskontrollierte Versuche (LCF) werden von diesem Dokument nicht erfasst.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. 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).

DIN EN ISO 7500-1, *Metallische Werkstoffe — Kalibrierung und Überprüfung von statischen einachsigen Prüfmaschinen — Teil 1: Zug- und Druckprüfmaschinen — Kalibrierung und Überprüfung der Kraftmesseinrichtung*

ISO 4965-1, *Metallic materials — Dynamic force calibration for uniaxial fatigue testing — Part 1: Testing systems*

ISO 4965-2, *Metallic materials — Dynamic force calibration for uniaxial fatigue testing — Part 2: Dynamic calibration device (DCD) instrumentation*

ISO 23788, *Metallic materials — Verification of the alignment of fatigue testing machines*

3 Begriffe

In diesem Dokument werden keine Begriffe aufgeführt.

DIN und DKE stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- DIN-TERMinologieportal: verfügbar unter <https://www.din.de/go/din-term>
- DKE-IEV: verfügbar unter <http://www.dke.de/DKE-IEV>

4 Formelzeichen und Abkürzungen

4.1 Formelzeichen

Die in der Norm verwendeten Formelzeichen werden in Tabelle 1 erläutert.

Tabelle 1 — Formelzeichen und ihre Bedeutung

Formelzeichen	Bedeutung
A	Fläche des Prüfquerschnitts einer Probe
A_T	Summe aller $i \cdot f_i$ im Treppenstufenverfahren
a_0	Regressionskonstante Zeitfestigkeitsgerade Perlenschnurverfahren
a_1	Regressionskoeffizient Zeitfestigkeitsgerade Perlenschnurverfahren
B_T	Summe aller $i^2 \cdot f_i$ im Treppenstufenverfahren
b	Breite des Prüfquerschnitts einer Flachprobe
C	Konstante zur Beschreibung der Lage der Zeitfestigkeitsgerade, Basquin-Gleichung, Schwingenspielzahl N für $L_a = 1$
D_T	Varianz zur Abschätzung der Standardabweichung im Treppenstufenverfahren
d	Durchmesser des Prüfquerschnitts einer Rundprobe, Dicke des Prüfquerschnitts einer Flachprobe
d_{lg}	Stufensprung Treppenstufenverfahren, logarithmisch
$d_{lg,1/2}$	Stufensprung, um eine Laststufe zwischen zwei bestehenden Laststufen mit dem Stufensprung d_{lg} einzufügen
F	Kraft, allgemein
F_a	Kraftamplitude
F_m	Mittelwert der Kraft
F_o	Oberer zulässiger Fehler zur Wahl der Probenanzahl, 90 % der Ergebnisse sind unterhalb von F_o zu erwarten
F_T	Summe aller f_i im Treppenstufenverfahren
F_u	Unterer zulässiger Fehler zur Wahl der Probenanzahl, 90 % der Ergebnisse sind oberhalb von F_u zu erwarten
f	Prüffrequenz
f_i	Anzahl der Ereignisse (Brüche und Durchläufer) auf einer Laststufe i im Treppenstufenverfahren
i	Ordnungsziffer zur fortlaufenden Nummerierung von Proben oder Lasthorizonten
K_t	Formzahl
k	Neigung der Zeitfestigkeitsgerade
k_2	Neigung der Wöhlerlinie im Bereich der Langzeitfestigkeit, Wöhlerlinie Typ II
k_3	Neigung der Wöhlerlinie im Bereich der Langzeitfestigkeit, Wöhlerlinie Typ III
k_{GG}	Neigung der Zeitfestigkeitsgerade für die Grundgesamtheit
$k_{SP,i}$	Neigung der Zeitfestigkeitsgerade für die Stichprobe i
$(k_{SP})_{10\%}$	Neigung der Zeitfestigkeitsgerade einer großen Anzahl von Stichproben mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit von 10 %
$(k_{SP})_{90\%}$	Neigung der Zeitfestigkeitsgerade einer großen Anzahl von Stichproben mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit von 90 %

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Formelzeichen	Bedeutung
L	Lastgröße, allgemeine Beanspruchungsgröße
L_0	Niedrigster, auswertbarer Lasthorizont im Treppenstufenverfahren
L_a	Lastamplitude: Amplitude einer Lastgröße, z. B. Kraft, Spannung, Weg
L_{a1}	oberer Lasthorizont (Amplitude)
L_{a2}	unterer Lasthorizont (Amplitude)
$L_{a,\text{fiktiv}}$	Lastamplitude Perlenschnurverfahren für gemeinsamen, fiktiven Horizont
$L_{a,i}$	Lastamplitude von Versuch i im Perlenschnurverfahren
$L_{aL,5 \times 10^6}$	Langzeitfestigkeit für Grenzwingspielzahl 5 000 000 ($= L_{aL,5E6}$)
$L_{aL,10^7}$	Langzeitfestigkeit für Grenzwingspielzahl 10 000 000 ($= L_{aL,1E7}$)
$L_{aL,NG}$	Langzeitfestigkeit für Grenzwingspielzahl N_G
$L_{aL,NG,PA}$	Langzeitfestigkeit für Grenzwingspielzahl mit Wahrscheinlichkeit P_A
$L_{aL,NG,GG}$	Mittelwert der Langzeitfestigkeit für Grenzwingspielzahl, Grundgesamtheit, Auftretenswahrscheinlichkeit $P_A = 50 \%$
$L_{aL,NG,GG,10\%}$	Langzeitfestigkeit der Grundgesamtheit mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit $P_A = 10 \%$
$L_{aL,NG,GG,90\%}$	Langzeitfestigkeit der Grundgesamtheit mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit $P_A = 90 \%$
$L_{aL,NG,SP,i}$	Mittelwert der Langzeitfestigkeit für Grenzwingspielzahl, Stichprobe i , Auftretenswahrscheinlichkeit $P_A = 50 \%$
$(L_{aL,NG,SP})_{10\%}$	Mittelwert der Langzeitfestigkeit einer großen Anzahl von Stichproben mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit $P_A = 10 \%$
$L_{aL,NG,SP,10\%}$	Langzeitfestigkeit aus einer Stichprobe mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit $P_A = 10 \%$
$(L_{aL,NG,SP})_{50\%}$	Mittelwert der Langzeitfestigkeit einer großen Anzahl von Stichproben mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit $P_A = 50 \%$
$(L_{aL,NG,SP})_{90\%}$	Mittelwert der Langzeitfestigkeit einer großen Anzahl von Stichproben mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit $P_A = 90 \%$
$L_{aL,NG,SP,90\%}$	Langzeitfestigkeit aus einer Stichprobe mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit $P_A = 90 \%$
$L_{aL,NK}$	Lastamplitude am Knickpunkt der Wöhlerlinie zwischen Zeit- und Langzeitfestigkeit
L_B	Bruchlast bei quasistatischer Last
L_i	Laststufe i im Treppenstufenverfahren
L_m	Mittelwert der Last (Mittellast)
$L_{\max}$	Maximum der Last
$L_{\min}$	Minimum der Last
M_b	Biegemoment, Lastgröße
M_t	Torsionsmoment, Lastgröße
N	Schwingspielzahl
n	Anzahl der auswertbaren Proben (Versuche) einer Versuchsreihe, Stichprobenumfang
$N_{10\%}$	Schwingspielzahl für Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 10 \%$

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Formelzeichen	Bedeutung
$N_{10\%,L_{a,i}}$	Schwingspielzahl für Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 10\%$, Lasthorizont $L_{a,i}$ im Horizontenverfahren
$N_{10\%,GG}$	Schwingspielzahl für Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 10\%$, Grundgesamtheit
$N_{10\%,SP}$	Schwingspielzahl für Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 10\%$, Stichprobe
$N_{50\%}$	Mittelwert der Schwingspielzahl
$N_{50\%,1}$	Mittelwert der Schwingspielzahl, höchster belegter Lasthorizont im Perlenschnurverfahren
$N_{50\%,2}$	Mittelwert der Schwingspielzahl, niedrigster belegter Lasthorizont im Perlenschnurverfahren
$N_{50\%,fiktiv}$	Mittelwert der Schwingspielzahl auf fiktivem Horizont im Perlenschnurverfahren
$N_{50\%,GG}$	Mittelwert der Schwingspielzahl der Grundgesamtheit
$N_{50\%,L_{a1}}$	Mittelwert der Schwingspielzahl einer Stichprobe auf dem Lasthorizont L_{a1} , Horizontverfahren
$N_{50\%,L_{a2}}$	Mittelwert der Schwingspielzahl einer Stichprobe auf dem Lasthorizont L_{a2} , Horizontverfahren
$N_{50\%,L_{a,i}}$	Mittelwert der Schwingspielzahl einer Stichprobe auf dem Lasthorizont $L_{a,i}$, Horizontverfahren
$N_{50\%,SP,i}$	Mittelwert der Schwingspielzahl der Stichprobe i
$(N_{50\%,SP})_{10\%}$	Mittelwert der Schwingspielzahl einer großen Anzahl von Stichproben mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit $P_A = 10\%$
$(N_{50\%,SP})_{90\%}$	Mittelwert der Schwingspielzahl einer großen Anzahl von Stichproben mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit $P_A = 90\%$
$N_{90\%}$	Schwingspielzahl für Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 90\%$
$N_{90\%,L_{a,i}}$	Schwingspielzahl für Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 90\%$, Lasthorizont $L_{a,i}$ im Horizontenverfahren
$N_{90\%,GG}$	Schwingspielzahl für Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 90\%$, Grundgesamtheit
$N_{90\%,SP}$	Schwingspielzahl für Ausfallwahrscheinlichkeit $P_A = 90\%$, Stichprobe
N_A	Schwingspielzahl bis zum Erreichen eines Ausfallkriteriums (z. B. Anriss)
N_B	Schwingspielzahl bis zum Erreichen des Ausfallkriteriums „Bruch“
N_G	Grenzschwingspielzahl (Schwingspielzahl bei der ein Versuch als Durchläufer gewertet wird)
N_i	Schwingspielzahl in Versuch i
$N_{i,fiktiv}$	Schwingspielzahl von Versuch i nach Verschieben auf fiktiven Horizont im Perlenschnurverfahren
N_K	Knick-Schwingspielzahl (Knickpunkt der Wöhlerlinie zwischen Zeit- und Langzeitfestigkeit)
N_{K,P_A}	Knick-Schwingspielzahl einer Wöhlerlinie mit der Ausfallwahrscheinlichkeit P_A
N_{P_A}	Schwingspielzahl für Ausfallwahrscheinlichkeit P_A
N_{start}	Anzahl Schwingspiele während der Anlaufphase der Prüfmaschine
P_A	Ausfallwahrscheinlichkeit, Auftretenswahrscheinlichkeit
$P_{A,L_{a,i}}$	Ausfallwahrscheinlichkeit auf Lasthorizont i
R_a	Arithmetischer Mittenrauwert der Probenoberfläche

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Formelzeichen	Bedeutung
R_L	Lastverhältnis für Beanspruchungsgröße
R_m	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	Dehngrenze 0,2 %
R_z	Rautiefe der Probenoberfläche
r	Kerbradius
S_a	Nennspannungsamplitude, Lastgröße
S_m	Nenn-Mittelspannung, Lastgröße
S_b	Nennspannung Biegung, Lastgröße
S_{zd}	Nennspannung axial, Zug/Druck, Lastgröße
s	Schwingweg, Lastgröße
s_{lgL}	Standardabweichung der Logarithmen der Lastamplitude
$s_{lgL,s}$	Standardabweichung der Standardabweichungen der Logarithmen der Lastamplituden
$s_{lgL,GG}$	Standardabweichung der Logarithmen der Lastamplituden, Grundgesamtheit
$s_{lgL,SP,i}$	Standardabweichung der Logarithmen der Lastamplituden, Stichprobe i
$(s_{lgL,SP})_{10\%}$	Standardabweichung der Logarithmen der Lastamplituden einer großen Anzahl von Stichproben mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit $P_A = 10 \%$
$(s_{lgL,SP})_{90\%}$	Standardabweichung der Logarithmen der Lastamplituden einer großen Anzahl von Stichproben mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit $P_A = 90 \%$
s_{lgN}	Standardabweichung der Logarithmen der Schwingspielzahlen
$\tilde{s}_{lgN}$	Standardabweichung der Logarithmen der Schwingspielzahlen auf dem fiktiven Lasthorizont im Perlenschnurverfahren
$s_{lgN,La,i,korr}$	Standardabweichung der Logarithmen der Schwingspielzahlen, Lasthorizont $L_{a,i}$ im Horizontenverfahren, korrigiert für kleine Stichproben
$s_{lgN,GG}$	Standardabweichung der Logarithmen der Schwingspielzahlen, Grundgesamtheit
$s_{lgN,korr}$	Standardabweichung der Logarithmen der Schwingspielzahlen nach Korrektur für kleine Stichprobenumfänge
$\tilde{s}_{lgN,korr}$	Standardabweichung der Logarithmen der Schwingspielzahlen nach Korrektur für kleine Stichprobenumfänge, Perlenschnurverfahren
$s_{lgN,s}$	Standardabweichung der Standardabweichung der Logarithmen der Schwingspielzahlen
$s_{lgN,SP,i}$	Standardabweichung der Logarithmen der Schwingspielzahlen, Stichprobe i
$(s_{lgN,SP})_{10\%}$	Standardabweichung der Logarithmen der Schwingspielzahlen einer großen Anzahl von Stichproben mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit $P_A = 10 \%$
$(s_{lgN,SP})_{90\%}$	Standardabweichung der Logarithmen der Schwingspielzahlen einer großen Anzahl von Stichproben mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit $P_A = 90 \%$
T	Streuspanne
T_t	Nennspannung der Torsion, Lastgröße
T_k	Streuspanne für die Schätzung der Neigung der Zeitfestigkeitsgerade aus einer großen Anzahl von Stichproben
T_L	Streuspanne der Versuchsergebnisse in Richtung der Last
T_m	Streuspanne der Mittelwertschätzung für die Grundgesamtheit aus einer großen Anzahl von Stichproben

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Formelzeichen	Bedeutung
T_N	Streuspanne der Versuchsergebnisse in Richtung der Schwingspielzahl
$T_{N,L_{a,i}}$	Streuspanne der Versuchsergebnisse in Richtung der Schwingspielzahl, Lasthorizont $L_{a,i}$ im Horizontenverfahren
$T_{N,GG}$	Streuspanne der Grundgesamtheit in Richtung der Schwingspielzahl
$T_{N,SP}$	Streuspanne der Stichprobe in Richtung der Schwingspielzahl
T_{slgL}	Streuspanne der Standardabweichung der Logarithmen der Lastamplitude
T_{slgN}	Streuspanne der Standardabweichung der Logarithmen der Schwingspielzahlen
$T_{slgN,GG}$	Streuspanne der Standardabweichung der Logarithmen der Schwingspielzahlen, Grundgesamtheit
$T_{slgN,SP}$	Streuspanne der Standardabweichung der Logarithmen der Schwingspielzahlen, Stichprobe
t	Zeit
u	Quantil für Auftretenswahrscheinlichkeit bei Standardnormalverteilung
W_b	Widerstandsmoment gegen Biegung
W_p	Widerstandsmoment gegen Torsion
α	Verdrehwinkel, Lastgröße
ΔL	Schwingbreite der Last
ΔT	Temperaturdifferenz, Kelvin
σ	Örtliche Normalspannung, Lastgröße
τ	Örtliche Schubspannung, Lastgröße

4.2 Abkürzungen

B	Bruch (bzw. Ausfallkriterium erreicht)
D	Durchläufer
HCF	Zeitfestigkeit (en: High Cycle Fatigue)
LCF	Kurzzeitfestigkeit (en: Low Cycle Fatigue)
LLF	Langzeitfestigkeit (en: Long Life Fatigue)

5 Wöhlerlinie

Im Schwingfestigkeitsversuch (Einstufen-Schwingversuch) wird eine Werkstoffprobe oder ein Bauteil (im Folgenden allgemein als Probe bezeichnet) mit einer sich periodisch ändernden (zyklischen) Last beansprucht. Die Lastamplitude L_a und die Mittellast L_m sind während des Schwingfestigkeitsversuchs konstant. Abhängig von der Höhe der Lastamplitude L_a kann sie unterschiedlich häufig aufgebracht werden, bevor ein Ausfall der Probe erfolgt. Tritt bei kleinen Lastamplituden L_a kein Ausfall der Probe bis zum Erreichen einer Grenzschwingspielzahl N_G auf, wird das Versuchsergebnis als Durchläufer gewertet.

Die Wöhlerlinie wird in drei Abschnitte eingeteilt, siehe Bild 1:

- Kurzzeitfestigkeit (LCF):
(bis etwa 10^4 Schwingspiele)

Aufgrund plastischer Dehnungen durch eine hohe Lastamplitude L_a versagt die Probe nach wenigen Schwingspielen.

— Zeitfestigkeit (HCF):

(ab etwa 10^4 Schwingspiele bis zur Knick-Schwingenspielzahl N_K)

Abhängig von der Höhe der Lastamplitude L_a erfolgt nach N Schwingspielen ein Ausfall der Probe. Der Verlauf der Wöhlerlinie kann bei doppelt-logarithmischer Darstellung durch eine Gerade (Zeitfestigkeitsgerade) angenähert werden. Lage C (Achsenabschnitt der Schwingenspielzahl N für $L_a = 1$) und Neigung k der Zeitfestigkeitsgerade werden durch Gleichung (1) beschrieben [1]¹:

$$N = C \cdot L_a^{-k} \quad (1)$$

Sind vom Knickpunkt die Lastamplitude $L_{aL,NK}$ und die Knick-Schwingenspielzahl N_K sowie die Neigung k der Zeitfestigkeitsgerade bekannt, wird die ertragbare Schwingenspielzahl N für beliebige Lastamplituden L_a nach Gleichung (2) berechnet:

$$N = N_K \cdot \left(\frac{L_a}{L_{aL,NK}} \right)^{-k} \quad (2)$$

Der Knickpunkt der Zeitfestigkeitsgerade zur Langzeitfestigkeit ist abhängig von Einflussgrößen wie z. B.:

- Werkstoff;
- Beanspruchungsart;
- Geometrie;
- Temperatur;
- Fügeverfahren.

Die Knick-Schwingenspielzahl N_K liegt meist im Bereich:

$$500\,000 < N_K < 10\,000\,000 \text{ Schwingspiele}$$

Die Zeitfestigkeitsgerade beschreibt die Häufigkeit mit der eine Lastamplitude ertragen werden kann, bis das definierte Ausfallkriterium erreicht wird.

— Langzeitfestigkeit (LLF):

(Schwingenspielzahl $N > \text{Knick-Schwingenspielzahl } N_K$)

Abhängig von der Lastamplitude L_a treten sowohl Brüche als auch Durchläufer auf. Nach dem Knickpunkt der Zeitfestigkeitsgeraden wird der weitere Verlauf der Wöhlerlinie in drei Typen unterschieden [2] [3] [4], siehe Bild 2:

Typ I: Horizontaler Verlauf der Wöhlerlinie, ausgeprägte Langzeitfestigkeit (früher als Dauerfestigkeit bezeichnet). Häufig bei kubisch-raumzentrierten Werkstoffen (z. B. ferritische Stähle).

Neigung $k_2 \rightarrow \infty$;

Typ II: Weiterer Abfall der Wöhlerlinie mit einer angenommenen Gerade geringere Neigung k_2 im Vergleich zum Zeitfestigkeitsbereich. Häufig beobachtet bei kubisch-flächenzentrierten oder

1 Nummern in eckigen Klammern beziehen sich auf die Literaturhinweise.

hexagonal dichtest gepackten Werkstoffen (z. B. austenitischer Stahl, Aluminium, Magnesium und Titan).

Liegen keine anderen Erfahrungswerte vor, wird für die Wöhlerlinien eine Neigung k_2 empfohlen [3]:

Stahl-Legierungen: $k_2 = 45$;

Aluminium-Legierungen: $k_2 = 22$:

Typ III: Nach zunächst quasi horizontalem Verlauf erfolgt ein weiterer Abfall mit einer angenommenen Gerade der Neigung k_3 bei etwa 10^8 Schwingspielen. Ausgehend von inneren Fehlstellen (z. B. nichtmetallische Einschlüsse) können bei hochfesten Stählen (z. B. Federstählen) und Versuchen mit geringem Spannungsgradienten (z. B. axiale Belastung von Stabproben) Anrisse unterhalb der Oberfläche auftreten. Wöhlerlinien vom Typ III sind nicht Bestandteil dieser Norm.

Versuche, die ohne Ausfall die Grenzschwingspielzahl N_G erreichen, werden als Durchläufer gewertet. Die verwendete Grenzschwingspielzahl N_G muss dokumentiert werden. Beispiele für die Grenzschwingspielzahl N_G sind:

— kubisch-raumzentrierte Werkstoffe (z. B. ferritische Stähle, Gusseisen):

$N_G = 5 \times 10^6$ Schwingspiele;

— kubisch-flächenzentrierte oder hexagonal dichtest gepackte Werkstoffe (z. B. austenitischer Stahl, Aluminium, Magnesium und Titan):

$N_G = 10^7$ Schwingspiele.

Da für darüber hinausgehende Schwingspielzahlen keine ausreichend allgemein gültigen Erkenntnisse vorliegen, ist eine Extrapolation auf Basis der experimentellen Ergebnisse nicht gesichert.

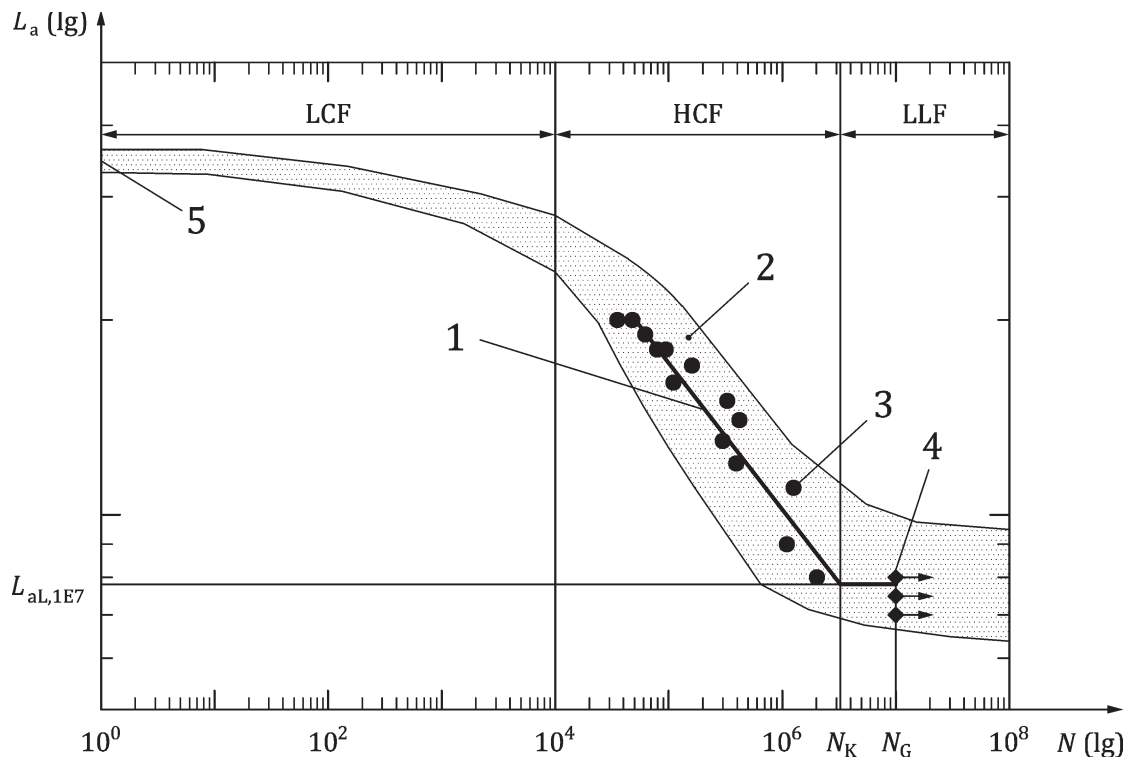
Anstelle der früher allgemein als Dauerfestigkeit bezeichneten Lastamplitude wird eine Langzeitfestigkeit L_{aL,N_G} definiert, die sich auf die Grenzschwingspielzahl bezieht, ab der ein Versuch als Durchläufer gewertet wird, z. B.:

$L_{aL,5 \times 10^6}$ oder $L_{aL,10^7}$ alternativ $L_{aL,5E6}$ oder $L_{aL,1E7}$

Die Langzeitfestigkeit ist abhängig von der Häufigkeit mit der eine Lastamplitude aufgebracht wird. Die Langzeitfestigkeit ist in der Regel nicht abhängig von der Zeitdauer, in der diese Lastamplituden aufgebracht werden.

Damit die Zeitfestigkeitsgerade im Wöhler-Diagramm als Gerade dargestellt werden kann, müssen beide Achsen logarithmisch skaliert werden.

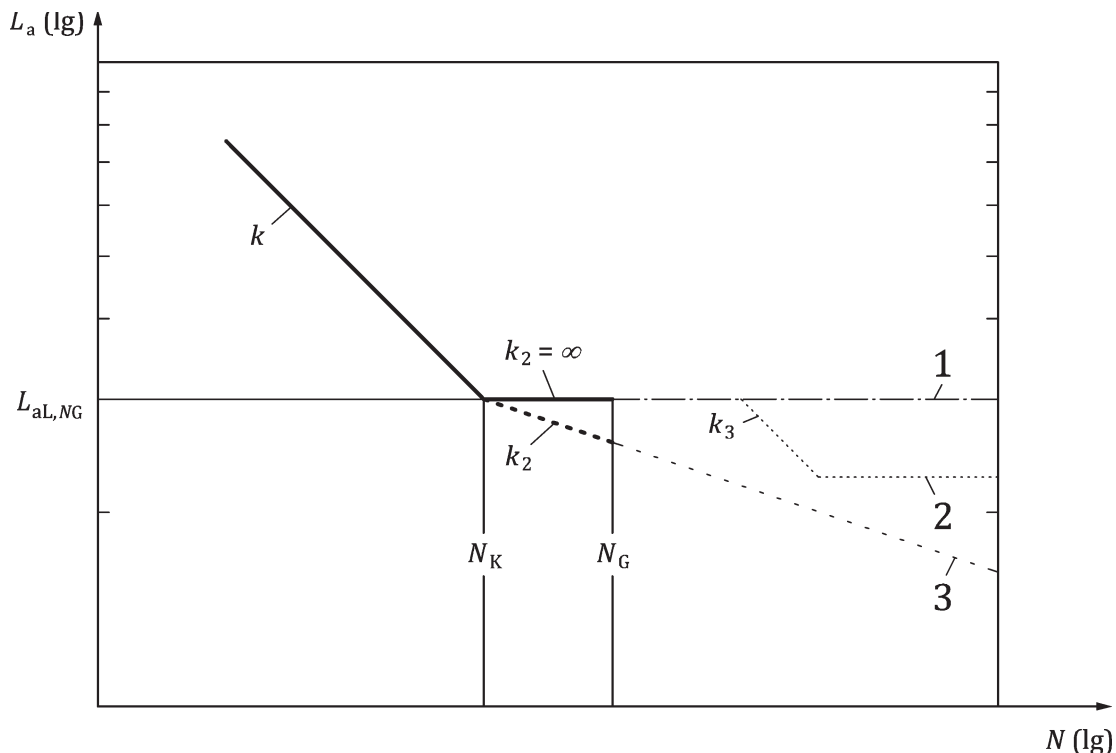
Ein Abknickpunkt kann nur angegeben werden, wenn sowohl die Zeitfestigkeitsgerade als auch die Langzeitfestigkeit experimentell ermittelt werden. Wird die Langzeitfestigkeit nicht experimentell ermittelt, erfolgt die Darstellung der Zeitfestigkeitsgeraden im Bereich zwischen dem höchsten und dem niedrigsten belegten Lasthorizont. Eine Extrapolation über diesen Bereich hinaus ist nicht zulässig.



Legende

- 1 Zeitfestigkeitsgerade
- 2 Streuband der Versuche
- 3 Ausfall
- 4 Durchläufer
- 5 Statische Festigkeit

Bild 1 — Wöhlerdiagramm (schematisch)



Legende

- 1 Typ I
- 2 Typ III
- 3 Typ II

Bild 2 — Wöhlerdiagramm im Bereich hoher Schwingspielzahlen (schematisch)

Die Ergebnisse von Schwingfestigkeitsversuchen streuen sowohl im Zeit- als auch im Langzeitfestigkeitsbereich. Im Zeitfestigkeitsbereich erfolgt eine Betrachtung der Streuung in Richtung der Schwingspielzahl. Im Langzeitfestigkeitsbereich wird die Auftretenswahrscheinlichkeit von Brüchen und Durchläufern bei einer Grenzschningspielzahl in Lastrichtung betrachtet, Beispiel siehe Bild 3.

Kennzeichnend für Schwingfestigkeitsversuche ist, dass von einer kleinen Stichprobe auf den Lage- und Streuparameter der Grundgesamtheit geschlossen wird. Zur Auswertung von Versuchsergebnissen muss ein Verteilungsgesetz angenommen werden, das für die Grundgesamtheit als zutreffend angesehen wird. Für die Auswertung von Schwingfestigkeitsversuchen werden häufig folgende Verteilungsfunktionen verwendet:

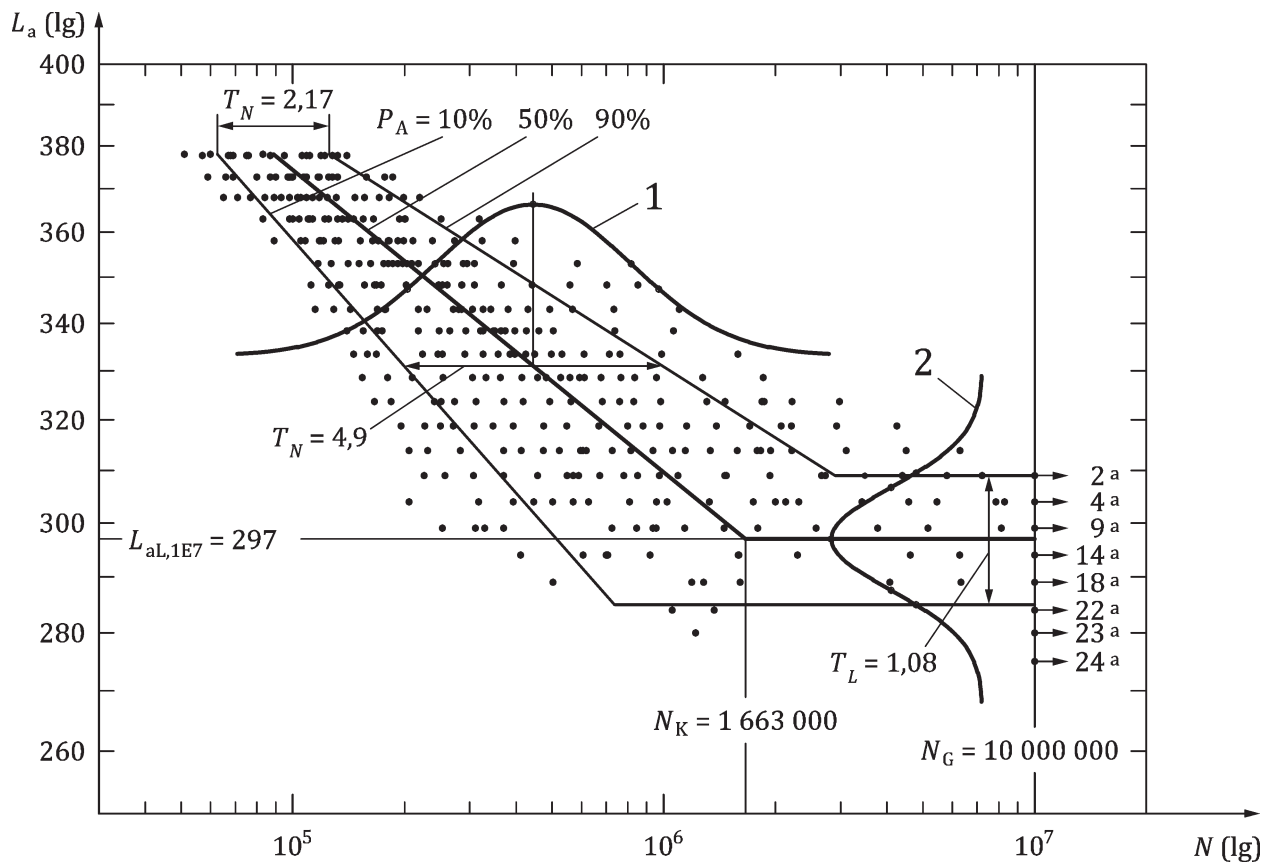
- Normalverteilung;
- logarithmische Normalverteilung;
- lineare Exponential-Verteilung;
- Weibull-Verteilung (zwei-/dreiparametrisch);
- Sin-Verteilung ($\arcsin\sqrt{P}$ -Transformation);
- Logit-Verteilung.

In dem Bereich, der mit den „üblichen“ Stichprobengrößen (z. B. 10 Stück bis 25 Stück) belegt werden kann, unterscheiden sich die Verteilungsfunktionen nur gering. Erst wenn in den Bereich sehr kleiner Ausfallwahrscheinlichkeit (z. B. 0,001 %) extrapoliert wird, können sich die Verteilungsfunktionen deutlicher

unterscheiden. Aufgrund der notwendigen großen Probenanzahl ($> 50\,000$ Stück) kann dieser Bereich experimentell nicht belegt werden.

Die logarithmische Normalverteilung wird überwiegend in der Literatur als Verteilungsfunktion für die Lebensdauerstreuung verwendet [5] [6] [7] [8] [9] [10]. In dieser Norm wird ausschließlich die logarithmische Normalverteilung zur Auswertung der Versuchsergebnisse eingesetzt, die durch Mittelwert und Standardabweichung vollständig beschrieben wird.

Während die Mittelwerte verschiedener Stichproben aus einer Grundgesamtheit in Zeit- und Langzeitfestigkeitsbereich im Mittel mit den bekannten Auswerteverfahren und den „üblichen“ Stichprobengrößen gut beschrieben werden können, ist eine verlässliche Abschätzung der Standardabweichung nur mit sehr großen Stichprobenumfängen möglich.



Legende

- 1 Streuung des Zeitfestigkeitsbereichs (Schwingspielzahlrichtung)
- 2 Streuung des Langzeitfestigkeitsbereichs (Lastrichtung)

^a Anzahl der Durchläufer

ANMERKUNG Daten entnommen aus [11].

Bild 3 — Beispiel für die Darstellung von Versuchsergebnissen im Zeit- und Langzeitfestigkeitsbereich

6 Lastgrößen

Die Beanspruchung der Proben erfolgt mit einer Lastgröße L , wie z. B.:

- Kraft F ;
- Biegemoment M_b ;

- Torsionsmoment M_t ;
- Schwingweg s ;
- Verdrehwinkel α .

Kann für die Probe ein Prüfquerschnitt A oder ein Widerstandsmoment W definiert werden, dürfen auch Nennspannungen als Lastgröße L verwendet werden, siehe Gleichung (3), Gleichung (4) und Gleichung (5):

- Zug-/Druck-Nennspannung (axial):

$$s_{zd} = \frac{F}{A} \quad (3)$$

- Biege-Nennspannung:

$$s_b = \frac{M_b}{W_b} \quad (4)$$

- Torsions-Nennspannung:

$$T_t = \frac{M_t}{W_p} \quad (5)$$

Ist für Proben mit Spannungskonzentrationen durch Kerben der Zusammenhang zwischen äußerer Last und örtlicher Spannung bekannt, werden auch elastizitätstheoretische, örtliche Spannungen als Lastgröße verwendet, z. B.:

- Normalspannungen σ ;
- Schubspannungen τ .

Zur Definition eines Schwingspiels und der beschreibenden Größen des Last-Zeit-Verlaufs siehe Bild 4.

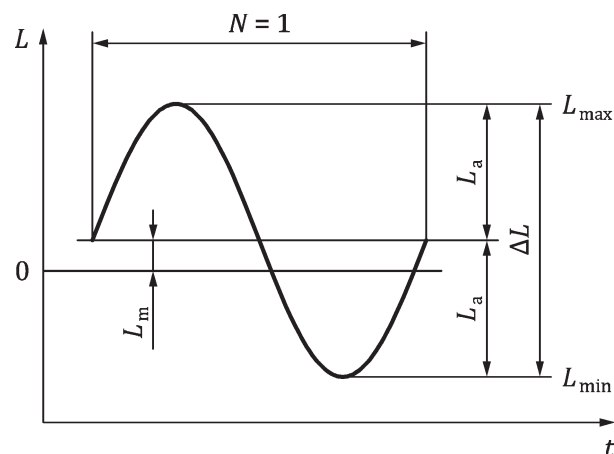


Bild 4 — Last-Zeit-Verlauf im Schwingfestigkeitsversuch (schematisch)

Der Lastamplitude L_a kann eine statische Mittellast L_m überlagert sein. Häufig wird die Mittellast mit dem Lastverhältnis R_L aus dem Verhältnis vom Minimum der Last $L_{\min}$ zum Maximum der Last $L_{\max}$ beschrieben. Das

Lastverhältnis kann auch für alle anderen Lastgrößen durch Gleichung (6) berechnet werden.

$$R_L = \frac{L_{\min}}{L_{\max}} \quad (6)$$

Eine Wöhlerlinie wird für ein konstantes Lastverhältnis R_L oder für eine konstante Mittellast L_m aufgenommen. Abhängig von der Mittellast L_m wird unterschieden in, siehe Bild 5:

a) Druck-Schwellbereich:

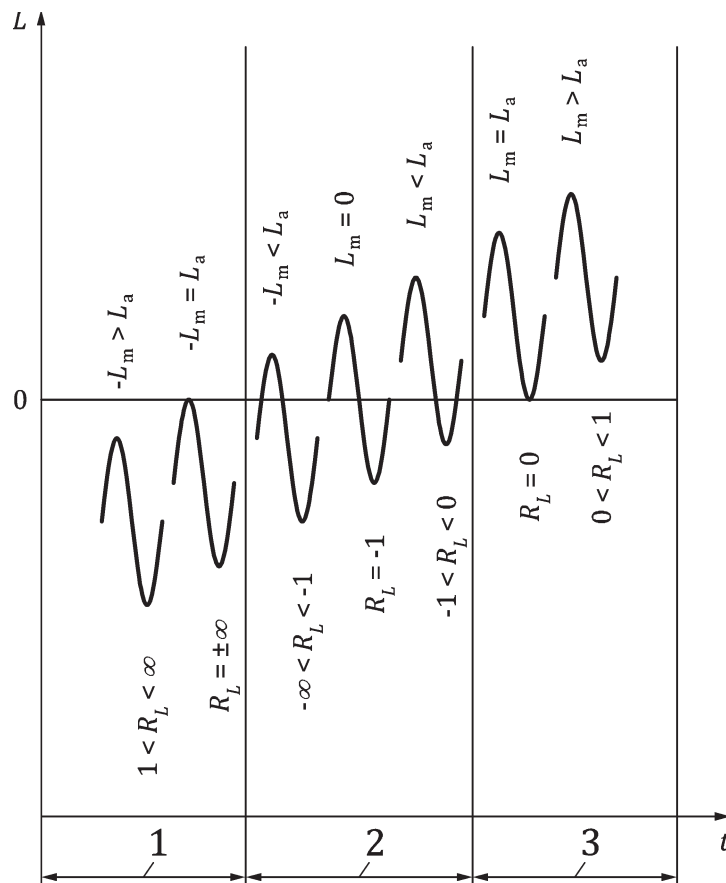
- 1) $L_{\max}$ und $L_{\min}$ sind negativ;
- 2) $-L_m \geq L_a$;
- 3) $R_L = L_{\min}/L_{\max} = +1$ (statische Drucklast) bis $-\infty$;

b) Wechselbereich:

- 1) $L_{\max}$ und $L_{\min}$ besitzen unterschiedliche Vorzeichen;
- 2) $|L_m| < L_a$;
- 3) $-\infty < R_L < 0$;

c) Zug-Schwellbereich:

- 1) $L_{\max}$ und $L_{\min}$ sind positiv;
- 2) $L_m \geq L_a$;
- 3) $R_L = L_{\min}/L_{\max} = 0$ bis $+1$ (statische Zuglast).



Legende

- 1 Druckschwelllast
- 2 Wechselast
- 3 Zugschwelllast

Bild 5 — Benennung der Last in Abhängigkeit vom Mittelwert L_m

Die Lastgrößen werden mit dem Lastverhältnis R_L umgerechnet, siehe Gleichung (7), Gleichung (8) und Gleichung (9):

$$L_a = L_{\max} \cdot \frac{(1 - R_L)}{2} \quad (7)$$

$$L_m = L_{\max} \cdot \frac{(1 + R_L)}{2} \quad (8)$$

$$L_m = L_a \cdot \frac{(1 + R_L)}{(1 - R_L)} \quad (9)$$

7 Probenform und Probenfertigung

Voraussetzung für die Ermittlung einer gültigen Wöhlerlinie ist die Verwendung von Proben gleicher Beschaffenheit in einer Versuchsreihe hinsichtlich z. B.:

- Werkstoff;
- Wärmebehandlung;

- Fertigungstechnik;
- Geometrie;
- Oberfläche.

Die Geometrie von Proben ist u. a. abhängig von:

- der Geometrie des Halbzeugs;
- der Prüfmaschine;
- der Beanspruchungsart.

Aufgrund der zahlreichen Zielstellungen von Versuchen kann keine allgemein gültige Probengeometrie angegeben werden. Im Folgenden werden Anforderungen genannt, die berücksichtigt werden müssen.

Bei der Wahl der Probengeometrie muss sichergestellt werden, dass keine Anrisse im Bereich der Probeneinspannung und im Übergang zwischen Einspannkopf und Prüfquerschnitt auftreten. Proben, bei denen Anrisse außerhalb des Prüfquerschnitts auftreten, müssen als ungültig verworfen werden.

ANMERKUNG Beispiele für die Geometrie von Proben können [12] [13] entnommen werden.

Bei Proben mit eckigem Prüfquerschnitt beginnen Anrisse häufig an einer Ecke. Aus diesem Grund müssen runde Prüfquerschnitte verwendet werden. Nur in Ausnahmefällen, z.B. bei Blechen, dürfen eckige Querschnitte verwendet werden.

Bei Halbzeugen, die einen Festigkeitsgradienten über dem Prüfquerschnitt besitzen (z. B. randschichtgehärtete Bauteile), sollten die Proben möglichst aus den Bauteilbereichen entnommen werden, die während des Betriebs hoch beansprucht werden.

Die Fertigungsparameter (z. B. Zustellung, Schnittgeschwindigkeit, Werkzeugverschleiß, Form- und Lagetoleranzen) haben maßgeblichen Einfluss auf die Schwingfestigkeit und müssen für alle Proben einer Versuchsreihe gleich sein. Die Fertigungsparameter müssen dokumentiert werden.

Während der Fertigung von Proben aus Halbzeugen können Eigenspannungen in die Probe eingebracht werden. Bei hohen Lastamplituden im Zeitfestigkeitsbereich und bei Proben mit Kerben werden die Eigenspannungen rasch abgebaut. Bei schwach gekerbten Proben und Lastamplituden im Übergangsbereich zur Langzeitfestigkeit können Eigenspannungen die ertragbare Lastamplitude erheblich beeinflussen.

Die Rauheit der Oberfläche von Proben hat maßgeblichen Einfluss auf die Schwingfestigkeit. Die Rauheit der Oberfläche muss für die Proben einer Versuchsreihe konstant gehalten und dokumentiert werden.

Liegt die Oberspannung im Versuch nahe an der Fließgrenze des Werkstoffs, überlagern sich Ermüdungs- und Kriechvorgänge. Dies ist zum Beispiel der Fall bei:

- glatten Proben (Formzahl $K_t \approx 1$) unter axialer Belastung;
- Versuchen mit Zug- oder Druck-Mittelspannungen;
- Werkstoffen mit niedriger Fließspannung (z. B. Tiefziehstähle).

Im Ergebnis solcher Versuche zeigen sich flache Zeitfestigkeitsgeraden mit großer Streuung.

Durch Verwendung von Proben mit einem Spannungsgradienten durch Kerben oder die Wahl der Beanspruchungsart (z. B. Biegung) kann der Einfluss des Kriechens minimiert werden.

8 Prüftechnik

Um die Lastamplitude zu erzeugen, dürfen unterschiedliche Prüftechniken verwendet werden, z. B.:

- a) Resonanzprüfmaschinen;
- b) servohydraulische Prüfmaschinen;
- c) servopneumatische Prüfmaschinen;
- d) elektromechanische Prüfmaschinen;
- e) elektrodynamische Prüfmaschinen;
- f) piezobasierte Prüfmaschinen.

Wesentlich ist, dass mit der gewählten Prüftechnik die Lastgrößen (Lastamplitude und Mittellast) während des Versuchs konstant gehalten und Änderungen der Steifigkeit von Probe oder Prüfaufbau ausgeglichen werden. Während des stabilen Prüflaufs (nach dem Anlaufen der Prüfmaschine) darf der Sollwert von Ober- und Unterlast höchstens um 3 % der Lastamplitude über- bzw. unterschritten werden. Für die Phase des Anlaufs der Prüfmaschine gilt:

- 1) die Dauer des Anlaufvorganges muss so kurz wie möglich realisiert werden;
- 2) nur die Schwingspiele im stabilen Prüflauf werden für die Gesamtschwingspielzahl gewertet;
- 3) die Anzahl der Schwingspiele während der Hochlaufphase bis zum Erreichen des stabilen Prüflaufs müssen dokumentiert werden;
- 4) Überschwinger um mehr als 3 % über den Sollwert der Lastamplitude müssen während des Anlaufs vermieden werden.

Die Prüfmaschine muss nach DIN EN ISO 7500-1 kalibriert werden und muss mindestens die Anforderungen nach Klasse 1 erfüllen. Die Ausrichtung des Laststranges muss dokumentiert werden. Bei axialer Belastung muss ISO 23788 berücksichtigt werden. Abhängig von der beschleunigten Masse zwischen Kraftsensor und Probe, dem Schwingweg und der Prüffrequenz kann es vorkommen, dass die Probe mit einer geringeren zyklischen Kraft beansprucht wird als vom Sensor gemessen. In diesem Fall muss durch eine zusätzliche dynamische Kalibrierung nach ISO 4965-1 bzw. ISO 4965-2 dieser Fehler minimiert werden. Die Durchführung der Kalibrierung muss dokumentiert werden.

Der eigentlichen Prüflast dürfen nur in geringem Umfang zusätzliche Lasten durch die Einspannung überlagert werden. Gewinde sind ungeeignet zur Zentrierung der Probe in der Einspannvorrichtung. In diesem Fall müssen zusätzlich Zentriersitze zwischen Probe und Einspannvorrichtung vorgesehen werden, die eine konzentrische und biegemomentfreie Fixierung der Probe sicherstellen.

Die Prüffrequenz darf keinen Einfluss auf die Schwingfestigkeit der Probe durch Erwärmung oder eine Änderung des Schadensmechanismus aufgrund hoher Beanspruchungsgeschwindigkeit haben. Sofern nicht anders festgelegt, müssen Versuche bei einer Umgebungstemperatur zwischen 10 °C und 35 °C durchgeführt werden. Während des Versuchs darf sich die an der Probe gemessene Temperatur durch die eingebrachte Verformungsarbeit gegenüber der Umgebungstemperatur maximal erhöhen um:

— $\Delta T = 30 \text{ K}$

für kubisch-raumzentrierte Werkstoffe (z. B. ferritische Stähle, Eisenguss);

— $\Delta T = 20 \text{ K}$

für kubisch-flächenzentrierte oder hexagonal dichtest gepackte Werkstoffe (z. B. austenitischer Stahl, Aluminium, Magnesium und Titan).

Überschreitet die Probentemperatur die oben genannten Werte, muss die Probentemperatur während des Versuchs dokumentiert werden.

ANMERKUNG Die Genauigkeit von Infrarotsensoren ist ausreichend, um die Probentemperatur berührungslos z.B. im Umlaufbiegeversuch zu messen.

Die Luftfeuchte kann Einfluss auf die Lebensdauer der Probe haben. Die Luftfeuchte muss während einer Versuchsreihe dokumentiert werden.

9 Versuchsdurchführung

9.1 Allgemeines

Bei der Versuchsdurchführung müssen die Bereiche von Zeit- und Langzeitfestigkeit unterschieden werden.

Im Bereich der Zeitfestigkeit wird immer ein Ausfallkriterium erreicht (z. B. Anriss oder Bruch). Nach einem Versuch im Zeitfestigkeitsbereich liegt als Ergebnis die Schwingungszahl N bei einer Lastamplitude L_a vor.

Im Bereich der Langzeitfestigkeit wird eine Grenzschnwingungszahl N_G festgelegt, ab der ein Versuch als Durchläufer gewertet wird. Als Ergebnis eines Versuchs wird eine Probe als „Ausfall“ oder „Durchläufer“ gewertet.

Zeit- und Langzeitfestigkeitsbereich erfordern unterschiedliche Vorgehensweisen bei der Versuchsdurchführung und -auswertung.

In beiden Bereichen wird nach Anfahren des Sollwerts der Wöhlerversuch in der Regel bis zum Erreichen des Ausfallkriteriums ohne Unterbrechung durchgeführt. Unterbrechungen des Prüfverlaufs müssen dokumentiert werden.

9.2 Zeitfestigkeit

9.2.1 Allgemeines

Der Verlauf der Wöhlerlinien kann im Bereich der Zeitfestigkeit durch eine Gerade angenähert werden, wenn beide Diagrammachsen logarithmisch skaliert sind. Die Lage und Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden hängen von zahlreichen Einflussgrößen ab, z. B.:

- Werkstoff;
- Geometrie der Probe;
- Beanspruchungsart;
- Fertigungsbedingungen;
- Wärmebehandlung;
- Oberflächenzustand.

In den Übergangsbereichen zur Kurzzeit- und zur Langzeitfestigkeit nimmt die Streuung der Versuchsergebnisse zu und ihre Lage im Wöhlerdiagramm wird nicht mehr durch die Zeitfestigkeitsgerade beschrieben. Werden Versuche in den Übergangsbereichen mit ausgewertet, führt dies zu Zeitfestigkeitsgeraden mit flacherer Neigung (k wird größer) und höherer Streuung. Andererseits steigt die Treffsicherheit bei der Abschätzung des Lageparameters C und der Neigung k , wenn möglichst viele Versuchsergebnisse nah an den Übergangsberei-

chen vorliegen. Versuchsergebnisse in der Mitte der Zeitfestigkeitsgeraden tragen weniger zur Treffsicherheit der Schätzung der Neigung k und der Lage C bei [14].

Zur Ermittlung der Zeitfestigkeitsgeraden muss das Perlenschnur- oder das Horizontenverfahren eingesetzt werden.

Im Perlenschnurverfahren wird auf einem beliebigen Lasthorizont im vermuteten Bereich der Zeitfestigkeit mit einem Versuch begonnen. Abhängig vom Versuchsergebnis werden die nächsten Versuche mit einer größeren oder kleineren Lastamplitude durchgeführt, um sich schrittweise an die Übergangsbereiche zur Kurz- und Langzeitfestigkeit heranzutasten.

Das Perlenschnurverfahren ist gut geeignet, wenn die Lage des Zeitfestigkeitsgebiets (HCF-Gebiet) vor den Versuchen nicht abgeschätzt werden kann.

Beim Horizontenverfahren werden vor Versuchsbeginn zwei Lasthorizonte möglichst nah der Übergangsbereiche zur Kurz- und Langzeitfestigkeit gewählt. Dies setzt vor Versuchsbeginn Kenntnisse über die ungefähre Lage der Zeitfestigkeitsgeraden voraus.

ANMERKUNG Beispiele für die Auswertung von Perlenschnur- oder Horizontenverfahren sind in E.1 und E.2 aufgeführt.

Die erforderliche Anzahl von Proben (Stichprobe SP) zur Bestimmung der Zeitfestigkeitsgeraden ist abhängig von der geforderten Treffsicherheit für die Abschätzung von Mittelwert, Standardabweichung oder Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden der Grundgesamtheit (GG). Die Treffsicherheit wird mit der Streuspanne T bewertet, die aus dem Verhältnis von Auftretenswahrscheinlichkeit $P_A = 90\%$ zu Auftretenswahrscheinlichkeit $P_A = 10\%$ gebildet wird. Aus Monte-Carlo-Simulationen wurden für eine große Anzahl von Stichproben aus einer vorgegebenen Grundgesamtheit für Mittelwert, Standardabweichung oder Neigung die Auftretenswahrscheinlichkeit $P_A = 90\%$ bzw. Auftretenswahrscheinlichkeit $P_A = 10\%$ ermittelt [10], siehe Bild 6.

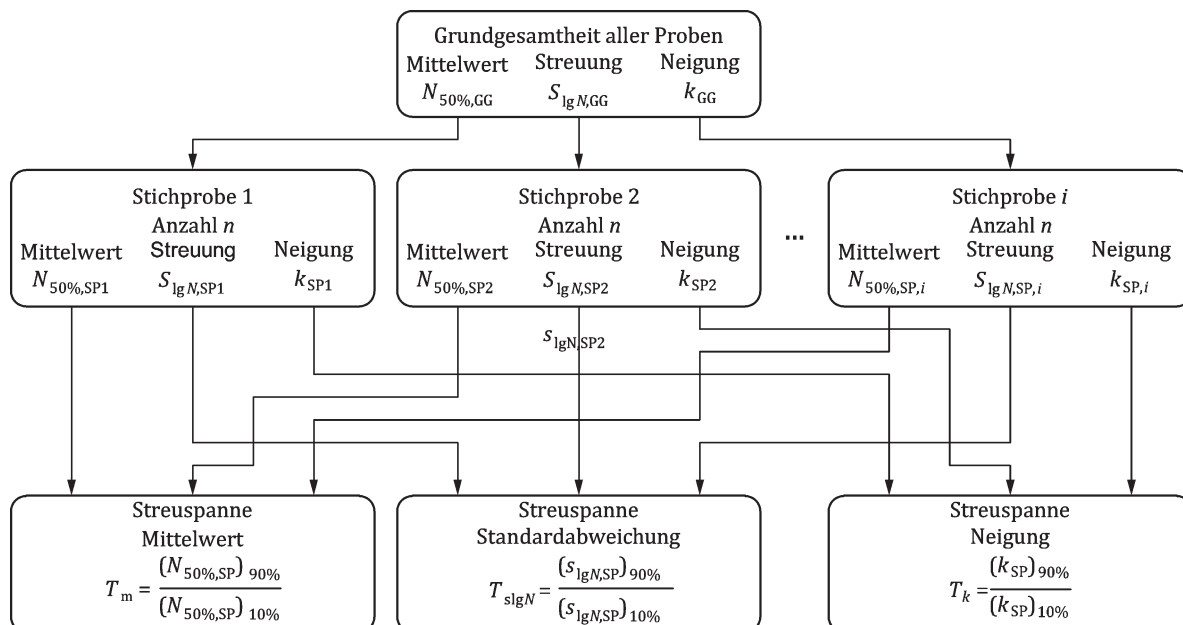
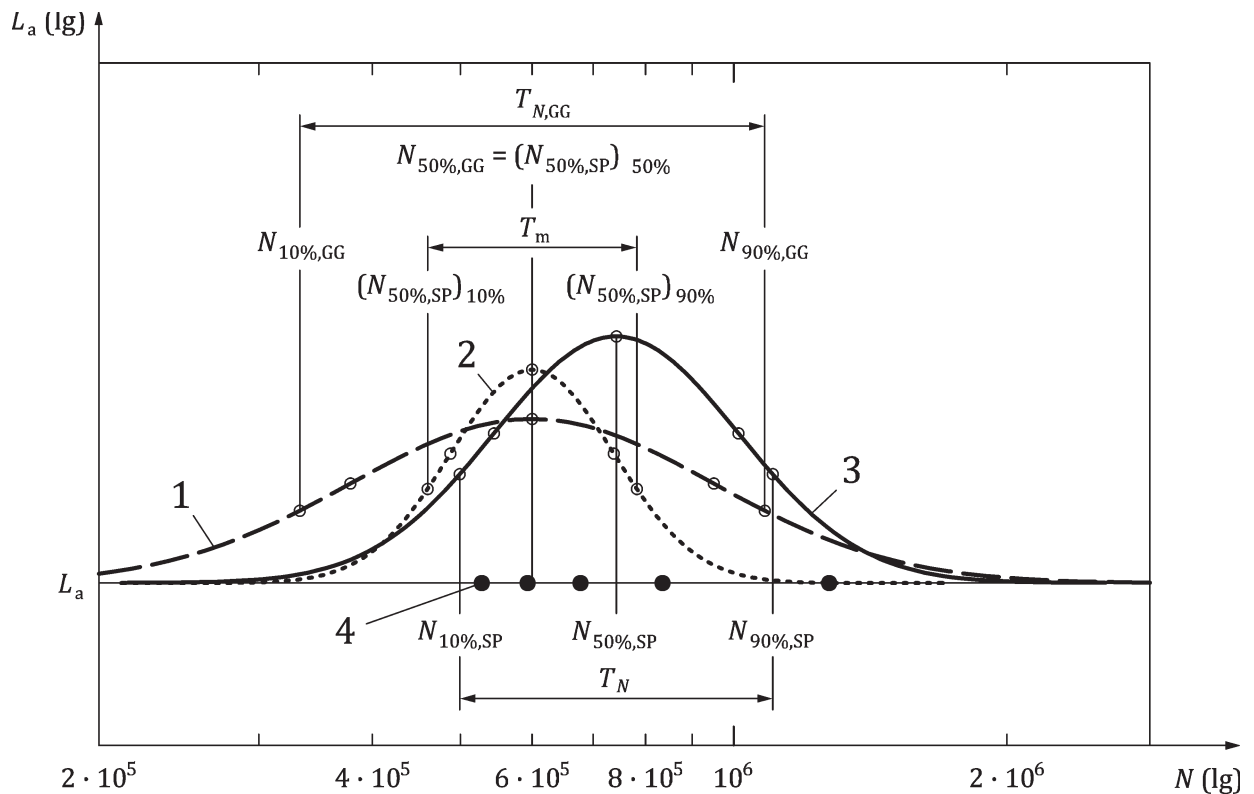


Bild 6 — Ermittlung der Streuspannen für Mittelwert und Standardabweichung durch Auswertung einer großen Anzahl von Stichproben aus Monte-Carlo-Simulationen

Der Mittelwert einer einzelnen Stichprobe wird meist vom Mittelwert der Grundgesamtheit abweichen, siehe Bild 7. Gleiches gilt für die Schätzung von Standardabweichung $s_{lgN,SP}$ und die Neigung k_{SP} auf Basis einer einzelnen Stichprobe. Die Breite der Streuspanne T , d. h. die Treffsicherheit, ist abhängig vom Stichprobenumfang.



Legende

- 1 Grundgesamtheit
- 2 Mittelwerte vieler Stichproben
- 3 einzelne Stichprobe
- 4 Versuchsergebnis

Bild 7 — Abschätzen des Mittelwerts der Grundgesamtheit auf der Basis einer Stichprobe

Für die Streuspanne des Mittelwertes T_m wird der Mittelwert der Schwingspielzahl mit 90 % Auftretenswahrscheinlichkeit $(N_{50\%,SP})_{90\%}$ auf die mit 10 % Auftretenswahrscheinlichkeit $(N_{50\%,SP})_{10\%}$ bezogen, siehe Gleichung (10).

$$T_m = \frac{(N_{50\%,SP})_{90\%}}{(N_{50\%,SP})_{10\%}} \quad (10)$$

Für die Streuspanne der Standardabweichung $T_{s \lg N}$ wird die Standardabweichung mit 90 % Auftretenswahrscheinlichkeit $(s_{\lg N,SP})_{90\%}$ auf die mit 10 % Auftretenswahrscheinlichkeit $(s_{\lg N,SP})_{10\%}$ bezogen, siehe Gleichung (11).

$$T_{s \lg N} = \frac{(s_{\lg N,SP})_{90\%}}{(s_{\lg N,SP})_{10\%}} \quad (11)$$

Für die Streuspanne der Neigung der Zeitfestigkeitslinie T_k wird die Neigung mit 90 % Auftretenswahrscheinlichkeit $(k_{SP})_{90\%}$ auf die mit 10 % Auftretenswahrscheinlichkeit $(k_{SP})_{10\%}$ bezogen, siehe Gleichung (12).

$$T_k = \frac{(k_{SP})_{90\%}}{(k_{SP})_{10\%}} \quad (12)$$

Die jeweilige Streuspanne T gibt Auskunft darüber, wie sicher Mittelwert $N_{50\%,GG}$, Standardabweichung $s_{lg N,GG}$ und die Neigung der Zeitfestigkeitslinie k_{GG} der Grundgesamtheit durch eine Stichprobe geschätzt werden können. Die Streuspanne ist zur Festlegung des benötigten Stichprobenumfangs n notwendig.

Ist der Stichprobenumfang n vorgegeben wird, mit der jeweiligen Streuspanne T aus Tabelle 2 bis Tabelle 7 der Wert für 10 % Auftretenswahrscheinlichkeit bzw. 90 % Auftretenswahrscheinlichkeit für Mittelwert, Standardabweichung oder Neigung berechnet. In dem Intervall werden 80 % aller Versuchsergebnisse erwartet.

Der Mittelwert wird nach Gleichung (13) bzw. Gleichung (14) bestimmt:

$$(N_{50\%,SP})_{10\%} = \frac{N_{50\%,GG}}{\sqrt{T_m}} \quad (13)$$

$$(N_{50\%,SP})_{90\%} = N_{50\%,GG} \cdot \sqrt{T_m} \quad (14)$$

Die Standardabweichung wird nach Gleichung (15) bzw. Gleichung (16) bestimmt:

$$(s_{lg N,SP})_{10\%} = \frac{s_{lg N,GG}}{\sqrt{T_{s lg N}}} \quad (15)$$

$$(s_{lg N,SP})_{90\%} = s_{lg N,GG} \cdot \sqrt{T_{s lg N}} \quad (16)$$

Die Neigung der Zeitfestigkeitsgerade wird nach Gleichung (17) bzw. Gleichung (18) bestimmt:

$$(k_{SP})_{10\%} = \frac{k_{GG}}{\sqrt{T_k}} \quad (17)$$

$$(k_{SP})_{90\%} = k_{GG} \cdot \sqrt{T_k} \quad (18)$$

Die zu erwartende prozentuale Abweichung des Ergebnisses einer Stichprobe von Mittelwert, Standardabweichung oder Neigung der Grundgesamtheit wird mit der Streuspanne T berechnet. Die Ergebnisse von 90 % aller Stichproben werden oberhalb des unteren Fehlers F_u liegen, 10 % aller Stichproben werden darunter liegen. Der untere Fehler F_u wird nach Gleichung (19) bestimmt:

$$F_u = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{T}}\right) \cdot 100 \quad (19)$$

Die Ergebnisse von 90 % aller Stichproben werden unterhalb des oberen Fehlers F_o liegen, 10 % aller Stichproben werden darüber liegen. Der obere Fehler F_o wird nach Gleichung (20) bestimmt:

$$F_o = (\sqrt{T} - 1) \cdot 100 \quad (20)$$

Die Ergebnisse von 80 % aller Stichproben liegen zwischen dem unteren Fehler F_u und dem oberen Fehler F_o . Unter Annahme einer Standardabweichung $s_{lg N,GG} = 0,20$ der Grundgesamtheit werden der untere Fehler F_u und der obere Fehler F_o in Abhängigkeit des Stichprobenumfangs in Tabelle 2 bis Tabelle 7 angegeben. Für davon abweichende Standardabweichungen der Grundgesamtheit $s_{lg N,GG}$ enthalten Anhang Abzw. Anhang B entsprechende Tabellen.

9.2.2 Perlenschnurverfahren

Die Versuche werden auf verschiedenen Lasthorizonten im Zeitfestigkeitsbereich durchgeführt und anschließend gemeinsam durch eine Regression mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate in Richtung der Schwingungszahl ausgewertet, siehe Bild 8. Auf einem Lasthorizont sind mehrere Versuche zulässig.

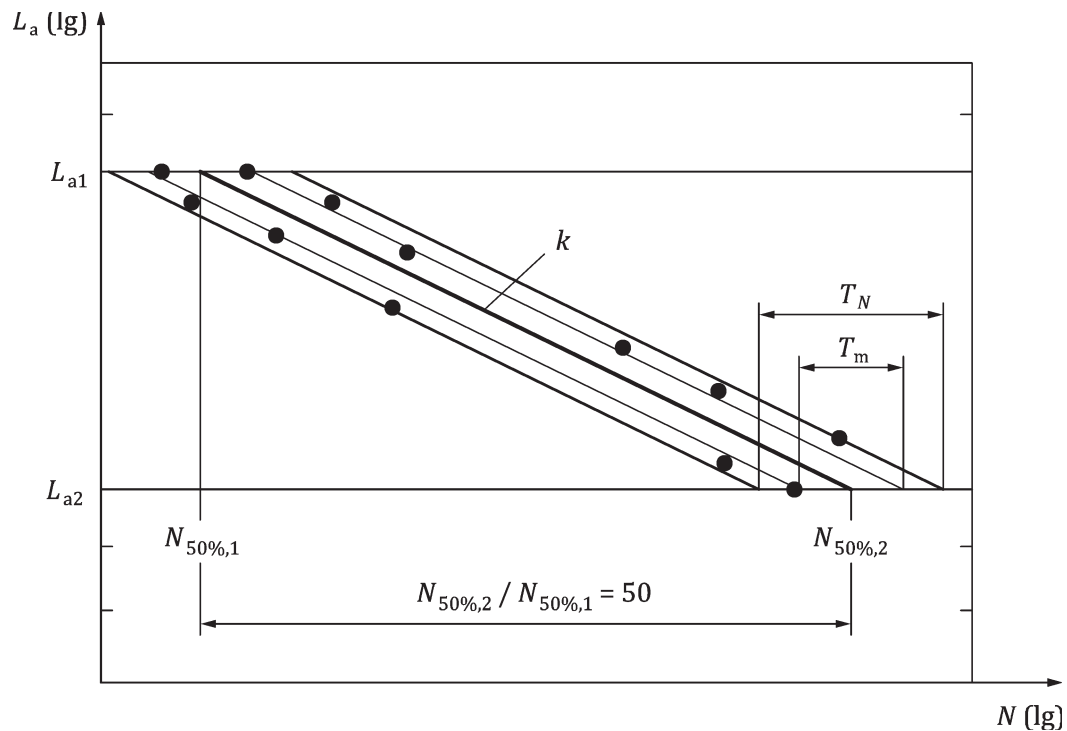


Bild 8 — Wöhlerdiagramm (schematisch), Perlenschnurverfahren

Mit dem Perlenschnurverfahren werden Mittelwert und Standardabweichung sowie die Neigung der Zeitfestigkeitsgeraden der Grundgesamtheit aller Proben auf Basis einer Stichprobe geschätzt. Das Ergebnis einer Stichprobe wird in der Regel von dem der Grundgesamtheit abweichen. Von der geforderten Treffsicherheit der Schätzung ist die Anzahl der erforderlichen Proben in der Stichprobe abhängig. Für Perlenschnur- und Horizontenverfahren gelten die Angaben zur Streuspanne für den Zeitfestigkeitsbereich zwischen 20 000 Schwingspielen und 500 000 Schwingspielen. Die erforderliche Probenanzahl wird in Tabelle 2, Tabelle 2.3 und Tabelle 4 in Abhängigkeit von der geforderten Treffsicherheit (Streuspanne T) angegeben, für die Schätzung von:

- dem Mittelwert $N_{50\%,GG}$ der Grundgesamtheit;
- der Standardabweichung $s_{lgN,GG}$ der Grundgesamtheit;
- der Neigung k_{GG} der Zeitfestigkeitsgeraden für die Grundgesamtheit.

Basis für die Schätzung ist:

- der Mittelwert $N_{50\%,SP,i}$ der Stichprobe;
- die Standardabweichung $s_{lgN,SP,i}$ der Stichprobe;
- die Neigung $k_{SP,i}$ der Zeitfestigkeitsgeraden für die Stichprobe.

Mit der Streuspanne T wird das Intervall zwischen 10 % und 90 % Auftretenswahrscheinlichkeit P_A beschrieben. Im Bereich $10\% \leq P_A \leq 90\%$ folgen die Schätzwerte annähernd einer lg-Normalverteilung. Darüber hinausgehende Extrapolationen sind unsicher, da der Verlauf der Verteilungsfunktion für die Grundgesamtheit nicht bekannt ist.

Für die Auswahl der erforderlichen Anzahl von Proben für die Stichprobe müssen zunächst Annahmen über die Grundgesamtheit getroffen werden:

i) Standardabweichung $s_{lgN,GG}$ der Grundgesamtheit

Übliche Standardabweichungen $s_{lgN,GG}$ liegen zwischen 0,10 und 0,30 [15]. Sind keine Erfahrungswerte bekannt wird $s_{lgN,GG} = 0,20$ angenommen.

ii) Abstand der Lasthorizonte in Richtung der Schwingspielzahl, Quotient der Mittelwerte $N_{50\%,2}/N_{50\%,1}$

Im Perlenschnurverfahren kann sich auf der Basis bereits vorliegender Versuchsergebnisse an die Übergangsbereiche der Zeitfestigkeitsgeraden zur Kurz- bzw. Langzeitfestigkeit herangetastet werden. Der Quotient $N_{50\%,2}/N_{50\%,1}$ beschreibt den Abstand der mittleren Schwingspielzahlen $N_{50\%}$ auf dem höchsten bzw. niedrigsten experimentell belegten Lasthorizont L_{a1} bzw. L_{a2} , die für die Auswertung der Zeitfestigkeitsgeraden herangezogen wird. Liegen keine Erfahrungswerte vor, wird angenommen:

$$N_{50\%,1} = 20\,000 \text{ Schwingspiele};$$

$$N_{50\%,2} = 1\,000\,000 \text{ Schwingspiele};$$

$$N_{50\%,2}/N_{50\%,1} = 50.$$

Liegen die Lasthorizonte nah zusammen (Quotient $N_{50\%,2}/N_{50\%,1} < 5$) oder bei kleinem Stichprobenumfang ($n < 10$ Proben), ist die Schätzung des Mittelwertes T_m nicht mehr erwartungstreu. Die Abschätzung des Mittelwertes ist dann unzuverlässig. Dies gilt ebenso für die Schätzung von Standardabweichung und Neigung.

Abhängig davon, ob vorrangig Mittelwert, Standardabweichung oder Neigung mit der Versuchsreihe bestimmt wird, kann die erforderliche Probenzahl Tabelle 2, Tabelle 2.3 und Tabelle 4 entnommen werden:

- 1) Streuspanne T_m für die Schätzung der mittleren Schwingspielzahl der Grundgesamtheit $N_{50\%,GG}$ im Zeitfestigkeitsbereich zwischen 20 000 Schwingspielen und 500 000 Schwingspielen, siehe Tabelle 2 und Bild 9 sowie A.1.
- 2) Streuspanne $T_{s_{lgN}}$ für die Schätzung der Standardabweichung der Grundgesamtheit $s_{lgN,GG}$, siehe Tabelle 3 und Bild 10.
- 3) Streuspanne T_k für die Schätzung der Neigung k_{GG} der Wöhlerlinie für die Grundgesamtheit, siehe Tabelle 4 und Bild 11 sowie A.2.

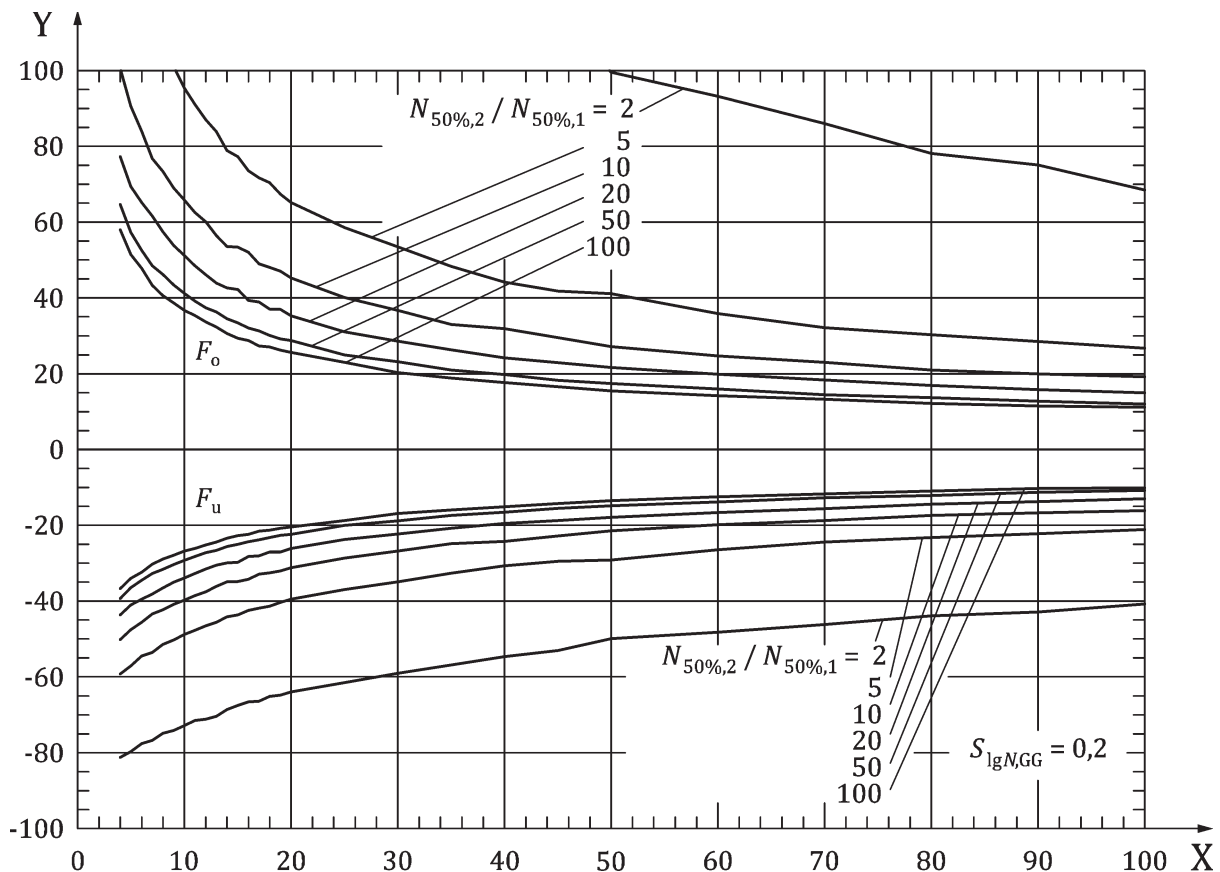
Tabelle 2 definiert die erforderliche Anzahl von Proben in Abhängigkeit von der geforderten Streuspanne T_m für die Mittelwertschätzung der Grundgesamtheit im Bereich zwischen 20 000 Schwingspielen und 500 000 Schwingspielen, unter der Annahme einer Standardabweichung $s_{lgN,GG}$ und dem erwarteten Verhältnis der mittleren Schwingspielzahlen $N_{50\%,2}/N_{50\%,1}$ auf dem niedrigsten bzw. höchsten ausgewerteten Lasthorizont der Versuchsreihe. Für andere Standardabweichungen der Grundgesamtheit $s_{lgN,GG}$ siehe A.1. Durch Stichproben geschätzte Mittelwerte $N_{50\%,SP}$ liegen bei 80 % aller Versuchsreihen zwischen dem in der Tabelle 2 angegebenen unteren Fehler F_u und dem oberen Fehler F_o .

Tabelle 2 — Perlenschnurverfahren, erforderliche Anzahl von Proben zur Schätzung des Mittelwertes $N_{50\%,GG}$ unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,20$ der Grundgesamtheit

n	Abstand der Lasthorizonte, Quotient $N_{50\%,2}/N_{50\%,1}$																	
	2			5			10			20			50			100		
	T_m	F_u	F_o	T_m	F_u	F_o	T_m	F_u	F_o	T_m	F_u	F_o	T_m	F_u	F_o	T_m	F_u	F_o
—	—	%	%	—	%	%	—	%	%	—	%	%	—	%	%	—	%	%
4	28,359	81,2	432,5	6,017	59,2	145,3	4,016	50,1	100,4	3,145	43,6	77,3	2,711	39,3	64,7	2,498	36,7	58,0
5	24,303	79,7	393,0	5,426	57,1	132,9	3,631	47,5	90,6	2,869	41,0	69,4	2,473	36,4	57,3	2,295	34,0	51,5
6	19,936	77,6	346,5	4,827	54,5	119,7	3,385	45,6	84,0	2,729	39,5	65,2	2,329	34,5	52,6	2,186	32,4	47,8
7	18,435	76,7	329,4	4,635	53,5	115,3	3,127	43,4	76,8	2,613	38,1	61,6	2,206	32,7	48,5	2,054	30,2	43,3
8	15,849	74,9	298,1	4,235	51,4	105,8	3,008	42,3	73,4	2,480	36,5	57,5	2,138	31,6	46,2	1,978	28,9	40,6
9	14,934	74,1	286,4	4,040	50,2	101,0	2,856	40,8	69,0	2,365	35,0	53,8	2,056	30,3	43,4	1,925	27,9	38,7
10	13,508	72,8	267,5	3,817	48,8	95,4	2,754	39,7	65,9	2,286	33,9	51,2	1,993	29,2	41,2	1,869	26,8	36,7
11	12,307	71,5	250,8	3,653	47,7	91,1	2,642	38,5	62,6	2,207	32,7	48,5	1,939	28,2	39,2	1,832	26,1	35,4
12	11,947	71,1	245,6	3,498	46,5	87,0	2,563	37,5	60,1	2,133	31,5	46,1	1,888	27,2	37,4	1,788	25,2	33,7
13	11,426	70,4	238,0	3,382	45,6	83,9	2,449	36,1	56,5	2,070	30,5	43,9	1,857	26,6	36,3	1,749	24,4	32,3
14	10,120	68,6	218,1	3,201	44,1	78,9	2,361	34,9	53,6	2,036	29,9	42,7	1,809	25,6	34,5	1,706	23,4	30,6
15	9,474	67,5	207,8	3,144	43,6	77,3	2,354	34,8	53,4	2,022	29,7	42,2	1,778	25,0	33,4	1,673	22,7	29,4
16	8,942	66,6	199,0	3,013	42,4	73,6	2,313	34,2	52,1	1,942	28,2	39,4	1,745	24,3	32,1	1,660	22,4	28,8
17	8,848	66,4	197,5	2,948	41,8	71,7	2,219	32,9	49,0	1,930	28,0	38,9	1,724	23,8	31,3	1,621	21,5	27,3
18	8,197	65,1	186,3	2,904	41,3	70,4	2,194	32,5	48,1	1,879	27,0	37,1	1,693	23,2	30,1	1,616	21,3	27,1
19	8,070	64,8	184,1	2,803	40,3	67,4	2,164	32,0	47,1	1,877	27,0	37,0	1,670	22,6	29,2	1,593	20,8	26,2
20	7,657	63,9	176,7	2,728	39,5	65,2	2,111	31,2	45,3	1,832	26,1	35,3	1,659	22,4	28,8	1,578	20,4	25,6
25	6,756	61,5	159,9	2,514	36,9	58,6	1,963	28,6	40,1	1,718	23,7	31,1	1,563	20,0	25,0	1,514	18,7	23,0
30	5,953	59,0	144,0	2,357	34,9	53,5	1,868	26,8	36,7	1,655	22,3	28,6	1,517	18,8	23,2	1,447	16,9	20,3
35	5,361	56,8	131,5	2,201	32,6	48,3	1,770	24,8	33,0	1,595	20,8	26,3	1,464	17,4	21,0	1,414	15,9	18,9
40	4,842	54,6	120,0	2,081	30,7	44,2	1,739	24,2	31,9	1,542	19,5	24,2	1,436	16,5	19,8	1,386	15,1	17,7
45	4,529	53,0	112,8	2,010	29,5	41,8	1,676	22,8	29,5	1,511	18,7	22,9	1,400	15,5	18,3	1,359	14,2	16,6
50	3,985	49,9	99,6	1,991	29,1	41,1	1,619	21,4	27,2	1,482	17,9	21,7	1,379	14,8	17,4	1,335	13,5	15,5
60	3,732	48,2	93,2	1,846	26,4	35,9	1,554	19,8	24,7	1,437	16,6	19,9	1,345	13,8	16,0	1,305	12,5	14,2
70	3,460	46,2	86,0	1,748	24,4	32,2	1,513	18,7	23,0	1,402	15,6	18,4	1,311	12,7	14,5	1,283	11,7	13,3
80	3,172	43,9	78,1	1,697	23,2	30,3	1,465	17,4	21,0	1,366	14,4	16,9	1,293	12,1	13,7	1,259	10,9	12,2
90	3,066	42,9	75,1	1,651	22,2	28,5	1,440	16,7	20,0	1,342	13,7	15,8	1,272	11,3	12,8	1,244	10,3	11,5
100	2,840	40,7	68,5	1,605	21,1	26,7	1,421	16,1	19,2	1,322	13,0	15,0	1,255	10,8	12,0	1,237	10,1	11,2

BEISPIEL 1 Soll die mittlere Schwingspielzahl im Versuch $N_{50\%,SP,i}$ bei mindestens 90 % der Versuchsreihen nicht mehr als 25 % größer als der Mittelwert der Grundgesamtheit $N_{50\%,GG}$ geschätzt werden, kann eine erforderliche Probenanzahl von 25 Stück Tabelle 2 bzw. Bild 9 entnommen werden. Der Auswahl der Probenanzahl liegt die Annahme zugrunde, dass die Grundgesamtheit eine Standardabweichung von $s_{lgN,GG} = 0,20$ aufweist und der Quotient $N_{50\%,2}/N_{50\%,1} = 50$ beträgt.

BEISPIEL 2 Werden $n = 10$ Proben für eine Versuchsreihe eingesetzt, wird der Bereich für die Schätzung der mittleren Schwingspielzahl der Grundgesamtheit $N_{50\%,GG}$ für 80 % aller Versuchsreihen von einem unteren Fehler $F_u = 29,2\%$ und einem oberen Fehler $F_o = 41,2\%$ begrenzt, siehe Tabelle 2 bzw. Bild 9. Nimmt man eine mittlere Schwingspielzahl der Grundgesamtheit von $N_{50\%,GG} = 100\,000$ Schwingspiele an, ist zu erwarten, dass 80 % der durch Stichproben ermittelten Mittelwerte $N_{50\%,SP,i}$ im Bereich zwischen 70 800 Schwingspielen und 141 200 Schwingspielen liegen werden.



Legende

X Anzahl Proben

Y oberer Fehler F_o bzw. unterer Fehler F_u der Schätzung des Mittelwertes der Schwingspielzahl, in %

Bild 9 — Perlenschnurverfahren, erforderliche Probenanzahl zur Schätzung des Mittelwertes $N_{50\%,GG}$ (Ergebnisse aus je 20 000 Simulationen je Probenanzahl)

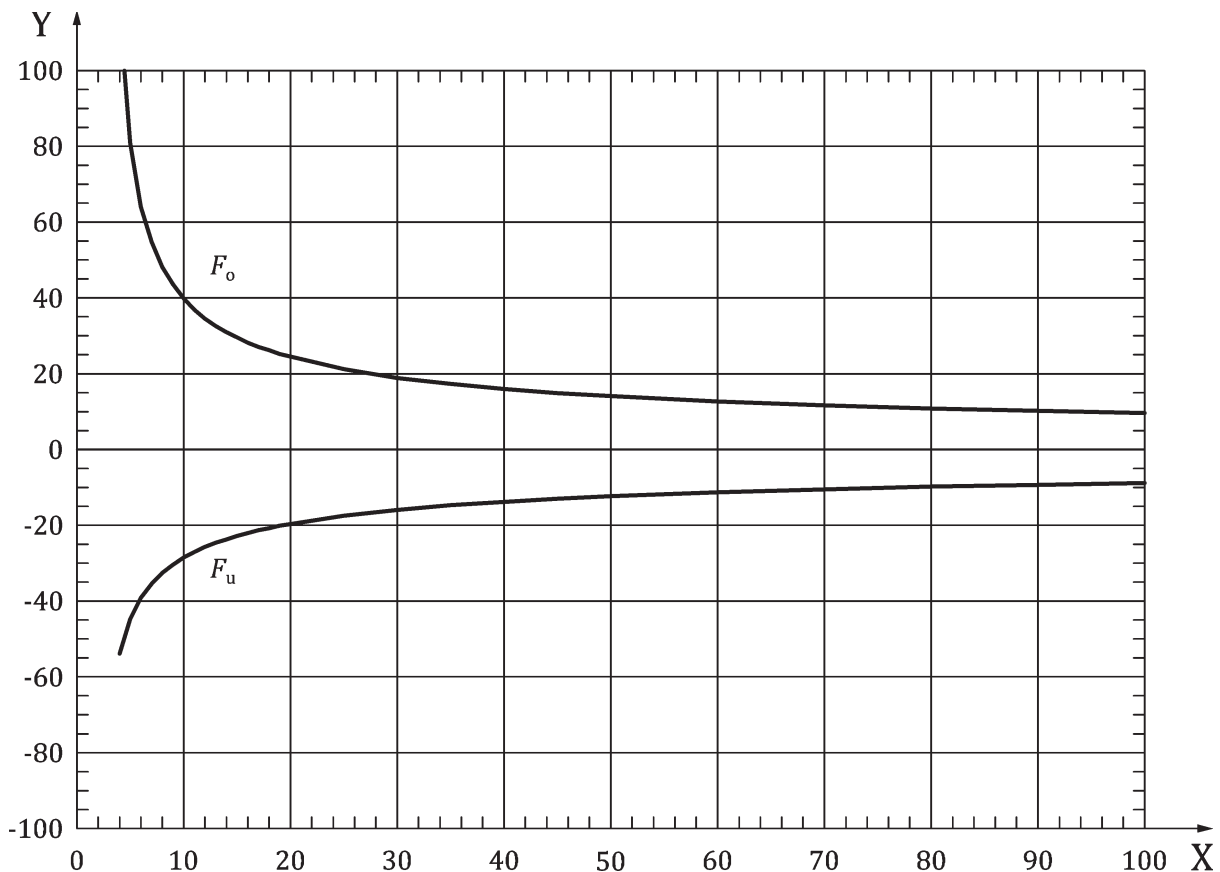
Die erforderliche Anzahl von Proben in Abhängigkeit von der geforderten Streuspanne $T_{s_{lgN,GG}}$ für die Schätzung der Standardabweichung der Grundgesamtheit $s_{lgN,GG}$ im Bereich zwischen 20 000 Schwingspielen und 500 000 Schwingspielen enthält Tabelle 3. Durch Stichproben geschätzte Standardabweichungen $s_{lgN,SP,i}$ liegen für 80 % aller Versuchsreihen zwischen dem in der Tabelle 3 angegebenen unteren Fehler F_u und dem oberen Fehler F_o .

Tabelle 3 — Perlenschnurverfahren, erforderliche Anzahl von Proben zur Schätzung der Standardabweichung $s_{lgN,GG}$

n —	$T_{s_{lgN}}$ —	F_u %	F_o %
4	4,706	53,9	116,9
5	3,270	44,7	80,8
6	2,694	39,1	64,1
7	2,397	35,4	54,8
8	2,196	32,5	48,2
9	2,065	30,4	43,7
10	1,958	28,5	39,9
11	1,874	27,0	36,9
12	1,810	25,7	34,5
13	1,759	24,6	32,6
14	1,717	23,7	31,0
15	1,680	22,8	29,6
16	1,643	22,0	28,2
17	1,615	21,3	27,1
18	1,592	20,8	26,2
19	1,568	20,1	25,2
20	1,549	19,7	24,5
25	1,470	17,5	21,2
30	1,414	15,9	18,9
35	1,376	14,7	17,3
40	1,345	13,8	16,0
45	1,321	13,0	14,9
50	1,302	12,3	14,1
60	1,270	11,3	12,7
70	1,249	10,5	11,7
80	1,229	9,8	10,8
90	1,215	9,3	10,2
100	1,201	8,8	9,6

BEISPIEL 3 Soll die Standardabweichung im Versuch $s_{lgN,SP,i}$ bei höchsten 10 % der Versuchsreihen mehr als 25 % kleiner als die Standardabweichung der Grundgesamtheit $s_{lgN,GG}$ geschätzt werden, kann eine erforderliche Probenanzahl von 13 Stück Tabelle 3 bzw. Bild 10 entnommen werden.

BEISPIEL 4 Werden $n = 10$ Proben für eine Versuchsreihe eingesetzt, wird der Bereich für die Schätzung der Standardabweichung der Grundgesamtheit $s_{lgN,GG}$ für 80 % aller Versuchsreihen von einem unteren Fehler $F_u = 28,5$ % und einem oberen Fehler $F_o = 39,9$ % begrenzt, siehe Tabelle 3 bzw. Bild 10. Nimmt man eine mittlere Standardabweichung der Grundgesamtheit von $s_{lgN,GG} = 0,20$ an, ist zu erwarten, dass 80 % der durch Stichproben ermittelten Mittelwerte $s_{lgN,SP,i}$ im Bereich zwischen 0,143 und 0,280 liegen werden.



Legende

X Probenanzahl

Y oberer Fehler F_o bzw. unterer Fehler F_u der Schätzung der Standardabweichung, in %

Bild 10 — Perlenschnurverfahren, erforderliche Probenanzahl zur Schätzung der Standardabweichung $s_{lgN,GG}$ (Ergebnisse aus je 20 000 Simulationen je Probenanzahl)

Die erforderliche Anzahl von Proben in Abhängigkeit von der geforderten Streuspanne T_k für die Schätzung der Neigung k_{GG} der Wöhlerlinie der Grundgesamtheit enthält Tabelle 4. Die angegebene Streuspanne gilt für den Bereich zwischen 20 000 Schwingspielen und 500 000 Schwingspielen, unter der Annahme einer Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,20$ und dem erwarteten Verhältnis der mittleren Schwingspielzahlen $N_{50\%,2}/N_{50\%,1}$ auf dem niedrigsten bzw. höchsten, ausgewerteten Lasthorizont der Versuchsreihe. Für andere Standardabweichungen $s_{lgN,GG}$ der Grundgesamtheit siehe A.2. Durch Stichproben geschätzte Neigungen $k_{SP,i}$ liegen für 80 % aller Versuchsreihen zwischen dem in der Tabelle 4 angegebenen unteren Fehler F_u und dem oberen Fehler F_o .

Tabelle 4 — Perlenschnurverfahren, erforderliche Anzahl von Proben zur Schätzung der Neigung der Wöhlerlinie k_{GG} unter Annahme der Standardabweichung $s_{lgN,GG} = 0,20$ der Grundgesamtheit

n	Abstand der Lasthorizonte, Quotient $N_{50\%,2}/N_{50\%,1}$																	
	2			5			10			20			50			100		
	T_k	F_u	F_o	T_k	F_u	F_o	T_k	F_u	F_o	T_k	F_u	F_o	T_k	F_u	F_o	T_k	F_u	F_o
—	—	%	%	—	%	%	—	%	%	—	%	%	—	%	%	—	%	%
4	6,701	61,4	158,9	2,957	41,8	71,9	2,211	32,7	48,7	1,834	26,2	35,4	1,592	20,8	26,2	1,480	17,8	21,7
5	6,305	60,2	151,1	2,795	40,2	67,2	2,095	30,9	44,7	1,763	24,7	32,8	1,560	19,9	24,9	1,445	16,8	20,2
6	5,901	58,8	142,9	2,626	38,3	62,1	2,018	29,6	42,1	1,715	23,6	30,9	1,507	18,5	22,8	1,428	16,3	19,5
7	5,678	58,0	138,3	2,555	37,4	59,8	1,934	28,1	39,1	1,670	22,6	29,2	1,471	17,6	21,3	1,383	15,0	17,6
8	5,431	57,1	133,0	2,448	36,1	56,4	1,888	27,2	37,4	1,628	21,6	27,6	1,452	17,0	20,5	1,365	14,4	16,8
9	5,185	56,1	127,7	2,381	35,2	54,3	1,832	26,1	35,4	1,589	20,7	26,1	1,426	16,3	19,4	1,355	14,1	16,4
10	4,982	55,2	123,2	2,275	33,7	50,8	1,794	25,3	33,9	1,560	19,9	24,9	1,406	15,7	18,6	1,334	13,4	15,5
11	4,753	54,1	118,0	2,202	32,6	48,4	1,750	24,4	32,3	1,539	19,4	24,1	1,389	15,2	17,9	1,326	13,2	15,2
12	4,638	53,6	115,4	2,147	31,7	46,5	1,724	23,8	31,3	1,499	18,3	22,4	1,371	14,6	17,1	1,310	12,6	14,5
13	4,467	52,7	111,3	2,098	31,0	44,8	1,684	22,9	29,8	1,493	18,2	22,2	1,362	14,3	16,7	1,294	12,1	13,8
14	4,209	51,3	105,1	2,045	30,1	43,0	1,654	22,2	28,6	1,476	17,7	21,5	1,347	13,8	16,0	1,283	11,7	13,3
15	4,217	51,3	105,4	2,017	29,6	42,0	1,638	21,9	28,0	1,454	17,1	20,6	1,333	13,4	15,4	1,274	11,4	12,9
16	4,021	50,1	100,5	1,967	28,7	40,2	1,628	21,6	27,6	1,442	16,7	20,1	1,321	13,0	14,9	1,273	11,4	12,8
17	3,974	49,8	99,3	1,944	28,3	39,4	1,585	20,6	25,9	1,432	16,4	19,7	1,313	12,7	14,6	1,256	10,8	12,1
18	3,792	48,6	94,7	1,913	27,7	38,3	1,578	20,4	25,6	1,416	16,0	19,0	1,309	12,6	14,4	1,254	10,7	12,0
19	3,771	48,5	94,2	1,860	26,7	36,4	1,560	19,9	24,9	1,406	15,7	18,6	1,296	12,2	13,9	1,244	10,4	11,6
20	3,696	48,0	92,3	1,844	26,4	35,8	1,543	19,5	24,2	1,396	15,4	18,2	1,290	11,9	13,6	1,241	10,2	11,4
25	3,339	45,3	82,7	1,744	24,3	32,1	1,475	17,7	21,5	1,344	13,7	15,9	1,257	10,8	12,1	1,213	9,2	10,1
30	3,133	43,5	77,0	1,681	22,9	29,7	1,433	16,5	19,7	1,312	12,7	14,6	1,236	10,0	11,2	1,195	8,5	9,3
35	2,957	41,8	72,0	1,624	21,5	27,4	1,391	15,2	17,9	1,296	12,2	13,9	1,211	9,1	10,0	1,182	8,0	8,7
40	2,783	40,1	66,8	1,562	20,0	25,0	1,374	14,7	17,2	1,268	11,2	12,6	1,202	8,8	9,6	1,168	7,5	8,1
45	2,626	38,3	62,0	1,530	19,2	23,7	1,346	13,8	16,0	1,251	10,6	11,9	1,185	8,2	8,9	1,159	7,1	7,7
50	2,429	35,8	55,9	1,517	18,8	23,2	1,321	13,0	14,9	1,240	10,2	11,4	1,178	7,9	8,5	1,145	6,6	7,0
60	2,301	34,1	51,7	1,445	16,8	20,2	1,294	12,1	13,8	1,217	9,3	10,3	1,162	7,2	7,8	1,135	6,1	6,5
70	2,220	32,9	49,0	1,402	15,5	18,4	1,268	11,2	12,6	1,203	8,8	9,7	1,147	6,6	7,1	1,127	5,8	6,2
80	2,085	30,7	44,4	1,376	14,8	17,3	1,246	10,4	11,6	1,186	8,2	8,9	1,141	6,4	6,8	1,117	5,4	5,7
90	2,031	29,8	42,5	1,349	13,9	16,2	1,235	10,0	11,1	1,174	7,7	8,3	1,130	5,9	6,3	1,111	5,1	5,4
100	1,966	28,7	40,2	1,330	13,3	15,3	1,224	9,6	10,6	1,164	7,3	7,9	1,123	5,6	6,0	1,104	4,8	5,1

BEISPIEL 5 Soll die Neigung der Wöhlerlinie im Versuch $k_{SP,i}$ für 80 % der Versuchsreihen nicht mehr als 15 % kleiner oder größer als die Neigung der Grundgesamtheit k_{GG} geschätzt werden, kann eine erforderliche Probenanzahl von 16 Stück Tabelle 4 bzw. Bild 11 entnommen werden. Der Auswahl der Probenanzahl liegt die Annahme zugrunde, dass die Grundgesamtheit eine Standardabweichung von $s_{lgN,GG} = 0,20$ aufweist und der Quotient $N_{50\%,2}/N_{50\%,1} = 50$ beträgt.

BEISPIEL 6 Werden $n = 10$ Proben für eine Versuchsreihe eingesetzt, wird der Bereich für die Schätzung der Neigung der Wöhlerlinie der Grundgesamtheit k_{GG} für 80 % aller Versuchsreihen von einem unteren Fehler $F_u = 15,7$ % und einem oberen Fehler $F_o = 18,6$ % begrenzt, siehe Tabelle 4 bzw. Bild 11. Nimmt man eine Neigung der Grundgesamtheit von $k_{GG} = 5$ an, ist zu erwarten, dass 80 % der durch Stichproben ermittelten Neigungen $k_{SP,i}$ im Bereich zwischen 4,22 und 5,93 liegen werden.