Experimentelle Bestimmung von Kerbwirkungszahlen sowie von Einflussfaktoren der Oberflächenverfestigung

Mänz, T.[1]; Wendler, J.[2]; Wild, J.[1]

[1] Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal
[2] Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion, TU Dresden

Die Auswertung experimentell gewonnener Dauerfestigkeiten hat häufig die Bestimmung von Kerbwirkungszahlen zum Ziel. Die Ermittlung dieser Größe muss durch inverse Anwendung jener Berechnungsvorschrift erfolgen, in die sie einfließt. Der Einfluss der Oberflächenverfestigung auf die Dauerfestigkeit wird in aktuellen Berechnungsvorschriften nur mit unzureichender Genauigkeit angegeben. Für genauere Aussagen empfiehlt sich deren Bestimmung basierend auf experimentellen Untersuchungen. Stand der Technik zur Auslegung von Wellen und Achsen sind die DIN 743 sowie die FKM-Richtlinie. Deren Anwendung zur Bestimmung der oben genannten Größen sollen im Rahmen dieser Ausarbeitung dargelegt werden.

The analysis of experimental gained fatigue strengths often has the purpose to determine fatigue notch factors. The calculation of these parameters has to take place by the inverse application of that calculation guideline in which they are used later. The influence of surface hardening on the fatigue strength is specified with insufficient accuracy in current calculation guidelines. For more precise statements experiments are necessary. State of the art in designing shafts and axles are the DIN 743 and the FKM-Richtlinie. Their application to calculate the above mentioned parameters is object of this paper.

1 Einleitung

Die experimentelle Untersuchung von Welle-Nabe-Verbindungen hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit ist eine häufige Problemstellung am Institut für Maschinenwesen. Gegenstand dieser ist, neben der Überprüfung, Präzisierung und Vervollständigung von Möglichkeiten zur Abschätzung der Kerbwirkung, die Bestimmung des Einflusses von Oberflächenverfestigungen (z. B. durch Kaltwalzen oder Einsatzhärten) auf die Dauerfestigkeit.

Die Bestimmung experimenteller Kerbwirkungszahlen erfolgt durch inverse Anwendung der gegenwärtig zur Verfügung stehenden Berechnungsvorschriften (DIN 743 /1/, FKM /2/). Grundlage dafür sind experimentell gewonnene Tragfähigkeiten, die mittels Treppenstufenverfahren und dem Auswerteverfahren nach Hück /3/ bestimmt werden können.

Im Nachfolgenden wird das Vorgehen zur Bestimmung experimenteller Kerbwirkungszahlen für Biegung und Torsion unter Anwendung der DIN 743 in allgemeiner Form erläutert. Zudem wird auf die Berechnung von Einflussfaktoren der Oberflächenverfestigung unter Berücksichtigung zuvor genannter Norm eingegangen. Des Weiteren wird das Vorgehen zur Bestimmung experimenteller Torsionskerbwirkungszahlen auf Grundlage der FKM-Richtlinie vorgestellt und Abweichungen zum Vorgehen nach DIN 743 aufgezeigt.

2 Anwendung der DIN 743

2.1 Berechnung experimenteller Kerbwirkungszahlen

Die Berechnung konkreter experimenteller Kerbwirkungszahlen nach der DIN 743 ist lediglich dann möglich, so lange nur eine der drei Belastungskategorien Zug/Druck, Biegung, Torsion dynamisch vorherrscht. Sollten mehrere dynamischer Art sein, liefert die Anwendung der DIN 743 eine Gleichung mit zwei (zwei dynamische Belastungskategorien) bzw. drei Unbekannten (drei dynamische Belastungskategorien), die zu keiner eindeutigen Lösung führt.

2.1.1 Biegekerbwirkungszahl β_σ

Nach der DIN 743 wird die Biegewechselfestigkeit des gekerbten Bauteils wie folgt berechnet:

$$\sigma_{bWK} = \frac{\sigma_{bW}(d_B) \cdot K_1(d_{eff})}{K_\sigma} \qquad 2.1$$

Der Gesamteinflussfaktor K_σ ist die Kumulation der Kerbwirkungszahl β_σ, des geometrischen Größeneinflussfaktors $K_2(d)$, des Einflussfaktors der Oberflächenrauheit $K_{F\sigma}$ sowie des Einflussfaktors der Oberflächenverfestigung K_v. Er wird nach Gleichung 2.2 berechnet.

$$K_\sigma = \left(\frac{\beta_\sigma}{K_2(d)} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1\right) \cdot \frac{1}{K_v} \qquad 2.2$$

Die Einflussfaktoren $K_{F\sigma}$ und K_v werden an dieser Stelle 1 gesetzt. Als Folge dieser Näherung sollte die aus der nachfolgenden Herleitung resultierende Gleichung zur Berechnung der experimentellen Kerbwirkungszahl nur dann Anwendung finden, wenn der Wellenprüfling keine nennenswerte Oberflächenverfestigung und zugleich eine geringe Oberflächenrauheit aufweist. Weiter ist nach der DIN 743-2 der technologische Größeneinfluss $K_1(d_{eff}) = 1$ zu wählen, wenn die Festigkeit des Werkstoffs des tatsächlich untersuchten Bauteils zugrunde gelegt wird. Somit folgt aus den Gleichungen 2.1 und 2.2 Gleichung 2.3 als Berechnungsvorschrift für die Biegekerbwirkungszahl:

$$\beta_\sigma = \frac{\sigma_{bW}(d_B) \cdot K_2(d)}{\sigma_{bWK}} = \frac{\sigma_{bW} \cdot K_2(d)}{\sigma_{bWK}} \qquad 2.3$$

Somit gilt es drei Eingangsgrößen zu bestimmen, die Biegewechselfestigkeit des ungekerbten Bauteils σ_{bW}, der geometrische Größeneinflussfaktor $K_2(d)$ und die Biegewechselfestigkeit des gekerbten Bauteils σ_{bWK}.

2.1.1.1 Biegewechselfestigkeit des ungekerbten Bauteils σ_{bW}

Aus Zeit- und Kostengründen ist die experimentelle Bestimmung der Wechselfestigkeit von ungekerbten Bauteilen häufig nicht Gegenstand experimenteller Untersuchungen. In der DIN 743-3 ist eine Möglichkeit zur Abschätzung dieser Größe gegeben. Basis hierfür ist die Zugfestigkeit des Bauteilwerkstoffs. Es gilt:

$$\sigma_{bW} \approx 0{,}5 \cdot \sigma_B \qquad 2.4$$

2.1.1.2 Geometrischer Größeneinflussfaktor $K_2(d)$

Gleichung 2.4 gilt für Bezugsdurchmesser kleiner gleich 7,5 mm. Bei einem größeren Bauteildurchmesser gilt es zu berücksichtigen, dass der Spannungsgradient abnimmt und sich damit verbunden die Stützwirkung verringert. Dieser Effekt muss bei Biege- als auch bei Torsionsbeanspruchung beachtet werden. Der geometrische Größeneinflussfaktor $K_2(d)$ hat genau dies zur Aufgabe. In Anlehnung an die DIN 743 berechnet sich dieser Faktor beispielsweise für Durchmesser größer gleich 7,5 mm bis kleiner als 150 mm wie folgt:

$$K_2(d) = 1 - 0{,}2 \cdot \frac{lg\left(\frac{d}{7{,}5mm}\right)}{lg20} \qquad 2.5$$

2.1.1.3 Biegewechselfestigkeit des gekerbten Bauteils σ_{bWK}

Die nachfolgend hergeleitete Gleichung zur Berechnung der Biegewechselfestigkeit des gekerbten Bauteils gilt nur für den Fall, dass σ_{mv}/σ_{ba} konstant ist. Zudem muss die Bedingung

$$\frac{\sigma_{mv}}{\sigma_{ba}} \leq \frac{\sigma_{bFK} - \sigma_{bWK}}{\sigma_{bWK} - \sigma_{bFK} \cdot \psi_{b\sigma K}} \qquad 2.6$$

erfüllt sein.

Aus der Gleichung zur Berechnung der Biegespannungsamplitude der Bauteildauerfestigkeit für bestimmte Mittelspannungen σ_{bADK}

$$\sigma_{bADK} = \frac{\sigma_{bWK}}{1 + \psi_{b\sigma K} \cdot \frac{\sigma_{mv}}{\sigma_{ba}}} \qquad 2.7$$

und dem Einflussfaktor der Mittelspannungsempfindlichkeit $\psi_{b\sigma K}$

$$\psi_{b\sigma K} = \frac{\sigma_{bWK}}{2 \cdot \sigma_B(d_B) - \sigma_{bWK}} \qquad 2.8$$

folgt:

$$\sigma_{bADK} = \frac{\sigma_{bWK}}{1 + \frac{\sigma_{bWK}}{2 \cdot \sigma_B(d_B) - \sigma_{bWK}} \cdot \frac{\sigma_{mv}}{\sigma_{ba}}} \qquad 2.9$$

Im Rahmen der experimentellen Bestimmung der Dauerfestigkeit eines Bauteils wird jener Punkt ermittelt, bei dem die tatsächlich wirkende Nennspannung σ_{ba} der Spannungsamplitude der Bauteildauerfestigkeit für die Mittelspannungen σ_{bADK} entspricht. Unter Anwendung der in der DIN 743 gegebenen Formel zur Berechnung der Sicherheit gegen Ermüdungsbruch gilt folglich:

$$S = \frac{\sigma_{bADK}}{\sigma_{ba}} = 1 \qquad 2.10$$

Aus den Gleichungen 2.9 und 2.10 folgt:

$$\sigma_{ba} = \frac{\sigma_{bWK}}{1 + \frac{\sigma_{bWK}}{2 \cdot \sigma_B(d_B) - \sigma_{bWK}} \cdot \frac{\sigma_{mv}}{\sigma_{ba}}} \qquad 2.11$$

Gleichung 2.11 entsprechend aufgelöst führt zur folgenden Darstellung:

$$\sigma_{bWK}^2 + \sigma_{bWK}[-\sigma_{ba} + \sigma_{mv} - 2 \cdot \sigma_B(d_B)] + 2 \cdot \sigma_B(d_B) \cdot \sigma_{ba} = 0 \qquad 2.12$$

Für dieses Polynom zweiten Grades können die Gleichungen 2.13 und 2.14 als zunächst rein mathematische Lösungen bestimmt werden. Welche davon Lösung der technischen Problemstellung ist, wird nachfolgend durch eine Plausibilitätskontrolle bestimmt.

$$\sigma_{bWK01} = \frac{1}{2}[\sigma_{ba} + 2\cdot\sigma_B(d_B) - \sigma_{mv}] - \sqrt{\frac{1}{4}[\sigma_{mv} - \sigma_{ba} - 2\cdot\sigma_B(d_B)]^2 - 2\cdot\sigma_B(d_B)\cdot\sigma_{ba}} \quad 2.13$$

$$\sigma_{bWK02} = \frac{1}{2}[\sigma_{ba} + 2\cdot\sigma_B(d_B) - \sigma_{mv}] + \sqrt{\frac{1}{4}[\sigma_{mv} - \sigma_{ba} - 2\cdot\sigma_B(d_B)]^2 - 2\cdot\sigma_B(d_B)\cdot\sigma_{ba}} \quad 2.14$$

Die Anwendung von Gleichung 2.14 führt dazu, dass die Wechselfestigkeit des gekerbten Bauteils σ_{bWK} über der Wechselfestigkeit des ungekerbten Bauteils σ_{bW} liegt. Dies resultiert in einer Kerbwirkungszahl kleiner als 1, was ihrer Grundidee widerspricht. Resultierend hieraus ist $\sigma_{bWK} = \sigma_{bWK01}$ die einzige Lösung der technischen Problemstellung.

2.1.2 Torsionskerbwirkungszahl β_τ

Analog zur oben angeführten Herleitung zur Berechnung experimenteller Biegekerbwirkungszahlen gilt für die experimentelle Bestimmung von Torsionskerbwirkungszahlen:

$$\beta_\tau = \frac{\tau_{tW}(d_B)\cdot K_2(d)}{\tau_{tWK}} = \frac{\tau_{tW}\cdot K_2(d)}{\tau_{tWK}} \quad 2.15$$

2.1.2.1 Torsionswechselfestigkeit des ungekerbten Bauteils τ_{tW}

Die Torsionswechselfestigkeit der glatten polierten Probe τ_{tW} kann nach der DIN 743-3 abgeschätzt werden. Es gilt:

$$\tau_{tW} \approx 0{,}3\cdot\sigma_B \quad 2.16$$

2.1.2.2 Geometrischer Größeneinflussfaktor $K_2(d)$

Der geometrische Größeneinflussfaktor $K_2(d)$ wird nach Gleichung 2.5 berechnet.

2.1.2.3 Torsionswechselfestigkeit des gekerbten Bauteils τ_{tWK}

Die nachfolgend angegebene Gleichung zur Berechnung der Torsionswechselfestigkeit des gekerbten Bauteils gilt nur für den Fall, dass τ_{mv}/τ_{ta} konstant ist. Zudem muss die Bedingung

$$\frac{\tau_{mv}}{\tau_{ta}} \leq \frac{\tau_{tFK} - \tau_{tWK}}{\tau_{tWK} - \tau_{tFK} \cdot \psi_{tK}} \tag{2.17}$$

erfüllt sein.

Die Herleitung der Torsionskerbwirkungszahl erfolgt analog zu jener der Biegekerbwirkungszahl. Resultierend ergibt sich Gleichung 2.18.

$$\tau_{tWK} = \frac{1}{2}[\tau_{ta} + 2 \cdot \sigma_B(d_B) - \tau_{mv}] - \sqrt{\frac{1}{4}[\tau_{mv} - \tau_{ta} - 2 \cdot \sigma_B(d_B)]^2 - 2 \cdot \sigma_B(d_B) \cdot \tau_{ta}} \tag{2.18}$$

2.2 Einfluss der Oberflächenverfestigung

Bei der in Kapitel 2.1 hergeleiteten Gleichung zur Berechnung von Kerbwirkungszahlen wird vorausgesetzt, dass keine Oberflächenverfestigung des Wellenprüflings vorliegt. Bei der Auswertung experimenteller Untersuchungen an Wellen mit chemisch-thermisch (Nitrieren, Einsatzhärten, Karbonitrieren), mechanisch (Rollen, Kugelstrahlen, durch Kaltwalzen hergestellte Verzahnungen) oder thermisch (Induktivhärten, Flammhärten) behandelter Oberfläche muss eine Angleichung erfolgen, da hier eine Oberflächenverfestigung vorliegt. Unter Berücksichtigung des Einflussfaktors der Oberflächenverfestigung K_v berechnet sich die experimentelle, von der Art der Beanspruchung abhängige, Kerbwirkungszahl wie folgt:

$$\beta_\sigma = \frac{\sigma_{bW} \cdot K_2(d) \cdot K_v}{\sigma_{bWK}} \tag{2.19}$$

$$\beta_\tau = \frac{\tau_{tW} \cdot K_2(d) \cdot K_v}{\tau_{tWK}} \tag{2.20}$$

Der Einflussfaktor der Oberflächenverfestigung K_v kann mit Hilfe von Tabelle 4 der DIN 743-2:2012 abgeschätzt werden. In Abhängigkeit des Verfestigungsverfahrens (chemisch-thermisch, mechanisch, thermisch) sowie des Wellendurchmessers sind Intervalle gegeben, innerhalb deren dieser Faktor erfahrungsgemäß liegt.

Um genauere Kenntnis über den Einflussfaktor der Oberflächenverfestigung zu erhalten, soll nachfolgend auf dessen Ermittlung anhand experimenteller Ergebnisse eingegangen werden.

Allgemein lässt sich die Kerbwirkungszahl β aus der Formzahl α durch Division dieser durch die Stützzahl n bestimmen, vgl. Gleichung 2.21.

$$\beta = \frac{\alpha}{n = f(G', Werkstoffzustand)} \qquad 2.21$$

Vergleicht man zwei Wellen gleicher Geometrie miteinander, wobei eine davon oberflächenverfestigt ist die andere jedoch nicht, so ändert sich die Formzahl α wie auch das bezogene Spannungsgefälle G' nicht. Diese Größen sind lediglich von der Geometrie und der Belastungsart abhängig. Die Stützzahl n hingegen ist eine vom Werkstoffzustand abhängige Größe. Unter Berücksichtigung von Gleichung 2.21 wird folglich ersichtlich, dass die Oberflächenverfestigung Einfluss auf die Kerbwirkungszahl nimmt.

In Tabelle 4 der DIN 743-2:2012 wird zwischen zwei K_v-Werten unterschieden, Zeile a und Zeile b. Bei den in Zeile a gegebenen Werten wird berücksichtigt, dass sich die Kerbwirkungszahl wie oben beschrieben mit veränderter Oberflächenfestigkeit K_v ändert. Bei den in Zeile b gegebenen Werten ist dies nicht der Fall. Hier wird von Konstanz der Kerbwirkungszahl ausgegangen. Der dort angegebene Einflussfaktor beinhaltet folglich die oberflächenverfestigungsbedingte Veränderung der Kerbwirkungszahl sowie den eigentlichen Oberflächenverfestigungsfaktor.

Die experimentelle Bestimmung des Einflussfaktors der Oberflächenverfestigung basiert auf den Gleichungen 2.19 und 2.20. Diese haben zunächst zwei Unbekannte (β, K_v) und sind damit nicht eindeutig lösbar. Dies ist erst dann möglich, wenn von Konstanz der Kerbwirkungszahl vom Fall des gekerbten nicht oberflächenverfestigten zum Fall des gekerbten oberflächenverfestigten Bauteils ausgegangen wird. Folglich enthält der Einflussfaktor der Oberflächenverfestigung wie oben beschrieben sowohl die Änderung der Festigkeit des Grundwerkstoffs als auch den Einfluss der Oberflächenverfestigung auf die Kerbwirkungszahl. Die ermittelten Werte sind somit jenen aus Zeile b der DIN 743-2:2012, Tabelle 4 zuzuordnen.

Die formelmäßige Definition des Einflussfaktors der Oberflächenverfestigung lautet:

$$K_v = \frac{\sigma_{bWK,OV}}{\sigma_{bWK,NOV}} \qquad 2.22$$

beziehungsweise

$$K_v = \frac{\tau_{tWK,OV}}{\tau_{tWK,NOV}} \qquad 2.23$$

Die Höhe der Wechselfestigkeit des gekerbten Bauteils σ_{bWK} bzw. τ_{tWK} ist unter anderem von der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs der Prüflinge abhängig. Diese kann von Charge zu Charge unterschiedlich sein. Bei den Gleichungen 2.22 und 2.23 wird davon ausgegangen, dass sowohl das oberflächenverfestigte (Index OV) als auch das nicht oberflächenverfestigte gekerbte Bauteil (Index NOV) der gleichen Charge entstammt und deren Grundwerkstoff folglich die gleiche Zugfestigkeit aufweist. Dies ist in der Praxis oftmals nicht der Fall. Häufig gilt es experimentelle Ergebnisse miteinander zu vergleichen, die an Prüflingen aus unterschiedlichen Chargen gewonnen wurden. Hier kann es zu erheblichen Unterschieden bei den Zugfestigkeiten des Grundwerkstoffs kommen. Nachfolgend soll diesbezüglich eine Kompensationsmöglichkeit dargestellt werden, die in Zusammenarbeit mit dem Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion der TU Dresden erarbeitet wurde. Hierbei soll gelten, dass die experimentell gewonnenen Ergebnisse der nicht oberflächenverfestigten Bauteile Charge I (Index I) und jene der oberflächenverfestigten Bauteile Charge II (Index II) entstammen.

Basierend auf Gleichung 2.2 berechnet sich der Gesamteinflussfaktor der oberflächenverfestigten Probe nach Gleichung 2.24

$$K_{\sigma,\tau,OV,II} = \left(\frac{\beta_{\sigma,\tau,OV}}{K_2(d)_{OV}} + \frac{1}{K_{F,OV}} - 1\right)\frac{1}{K_{v,OV}^{(b)}} \qquad 2.24$$

der der nicht oberflächenverfestigten Probe nach Gleichung 2.25

$$K_{\sigma,\tau,NOV,I} = \left(\frac{\beta_{\sigma,\tau,NOV}}{K_2(d)_{NOV}} + \frac{1}{K_{F,NOV}} - 1\right)\frac{1}{K_{v,NOV}^{(b)}} \qquad 2.25$$

Mit $K_{v,NOV}^{(b)} = K_{F,NOV} = K_{F,OV} = 1,\ K_2(d)_{NOV} = K_2(d)_{OV} = K_2(d)$ sowie $\beta_{\sigma,OV} = \beta_{\sigma,NOV}$ folgt nach Division von Gleichung 2.24 durch Gleichung 2.25:

$$K_{v,OV}^{(b)} = K_v^{(b)} = \frac{K_{\sigma,\tau,NOV,I}}{K_{\sigma,\tau,OV,II}} \qquad 2.26$$

Die Gesamteinflussfaktoren können dabei wie folgt berechnet werden:

$$K_{\sigma,NOV,I} = \frac{\sigma_{bW,NOV,I}}{\sigma_{bWK,NOV,I}} \text{ bzw. } K_{\tau,BH,I} = \frac{\tau_{tW,NOV,I}}{\tau_{tWK,NOV,I}} \qquad 2.27$$

$$K_{\sigma,OV,II} = \frac{\sigma_{bW,OV,II}}{\sigma_{bWK,OV,II}} \text{ bzw. } K_{\tau,EH,II} = \frac{\tau_{tW,OV,II}}{\tau_{tWK,OV,II}} \qquad 2.28$$

Somit folgt nach Einsetzen der Gleichungen 2.27 und 2.28 in Gleichung 2.26 für $K_v^{(b)}$:

$$K_{v,\sigma}^{(b)} = \frac{\sigma_{bWK,OV,II}}{\sigma_{bWK,NOV,I}} \cdot \frac{\sigma_{bW,NOV,I}}{\sigma_{bW,NOV,II}} \text{ bzw. } K_{v,\tau}^{(b)} = \frac{\tau_{tWK,OV,II}}{\tau_{tWK,NOV,I}} \cdot \frac{\tau_{tW,NOV,I}}{\tau_{tW,NOV,II}} \qquad 2.29$$

Unter Berücksichtigung der in der DIN 743-3 gegebenen Möglichkeit zur Abschätzung der Wechselfestigkeit der glatten Probe folgt aus Gleichung 2.29:

$$K_{v,\sigma,EH}^{(b)} = \frac{\sigma_{bWK,OV,II}}{\sigma_{bWK,NOV,I}} \cdot \frac{\sigma_{B,NOV,I}}{\sigma_{B,NOV,II}} \text{ bzw. } K_{v,\tau,EH}^{(b)} = \frac{\tau_{tWK,OV,II}}{\tau_{tWK,NOV,I}} \cdot \frac{\sigma_{B,NOV,I}}{\sigma_{B,NOV,II}} \qquad 2.30$$

3 Bestimmung der Torsionskerbwirkungszahl auf Basis der FKM-Richtlinie

Die folgenden Ausführungen zur Bestimmung der Torsionskerbwirkungszahl stützen sich auf die FKM-Richtlinie /2/. Das Vorgehen, also die Bestimmung der Wechselfestigkeit des ungekerbten sowie des gekerbten Bauteils und schließlich die Bestimmung der Kerbwirkungszahl, ist vergleichbar zu dem nach DIN 743. Die Berechnung der einzelnen Einflüsse weicht jedoch in Teilen ab und führt schließlich zu etwas unterschiedlichen Kerbwirkungszahlen. Weiterhin werden unterschiedliche Bezeichnungen für die jeweiligen Größen verwendet.

3.1 Torsionskerbwirkungszahl $K_{f,t}(d)$

Analog zu Gleichung 2.1 berechnet sich die Bauteilwechselfestigkeit $T_{WK,t}$ des gekerbten Bauteils aus der Werkstoff-Wechselfestigkeit $\tau_{W,s}$, also der Festigkeit eines ungekerbten Bauteils, und dem Konstruktionsfaktor $K_{WK,t}$ nach Gleichung 3.1:

$$T_{WK,t} = \frac{\tau_{W,s}}{K_{WK,t}} \qquad 3.1$$

Dabei berücksichtigt der Konstruktionsfaktor die Kerbwirkungszahl $K_{f,t}$, den Rauheitsfaktor $K_{R,\tau}$, den Randschichtfaktor K_V sowie den Schutzschichtfaktor K_s entsprechend Gleichung 3.2:

$$K_{WK,t} = \left(K_{f,t} + \frac{1}{K_{R,\tau}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_V \cdot K_S} \qquad 3.2$$

Bei Bauteilen ohne Oberflächenverfestigung, die eine polierte Oberfläche aufweisen und nicht aus Aluminium bestehen bzw. keine Schutzschicht aufweisen, können alle Faktoren außer $K_{f,t}$ zu 1 gesetzt werden. Ist dies nicht der Fall, sollten weitere Versuche zur Bestimmung der Faktoren entsprechend Kapitel 2.2 durchgeführt werden, da auch die FKM-Richtlinie nur grobe Werte für die Einflussfaktoren angibt.

Die Kerbwirkungszahl $K_{f,t}$ gilt zunächst nur für den untersuchten Bauteildurchmesser d sowie die untersuchte Kerbgeometrie. Ähnlich wie beim geometrischen Größeneinfluss $K_2(d)$ nach DIN 743 wird auch nach der FKM-Richtlinie der Größeneinfluss berücksichtigt. Zusätzlich zu dem sich ändernden Spannungsgefälle bei sich änderndem Bauteildurchmesser $n_\sigma(d)$ fließt auch das sich ändernde Spannungsgefälle $n_\sigma(r)$ bei sich änderndem Kerbradius in die Berechnung mit ein. Das Spannungsgefälle kann nicht experimentell bestimmt werden, da dieses den Verlauf der Spannungen in Bauteiltiefenrichtung abbildet. Zur Bestimmung des Spannungsgefälles müssen FE-Berechnungen durchgeführt werden.

Experimentell sind also die Wechselfestigkeit des ungekerbten Bauteils $\tau_{W,s}$ und die Wechselfestigkeit des gekerbten Bauteils $T_{WK,t}$ zu bestimmen.

3.2 Torsionswechselfestigkeit des ungekerbten Bauteils $\tau_{W,s}$

Wie in Kapitel 2.1.1.1 beschrieben, wird die Wechselfestigkeit aus Zeit- und Kostengründen in der Regel rechnerisch abgeschätzt. Nach der FKM-Richtlinie lässt sich die Torsionswechselfestigkeit basierend auf Gleichung 3.3 aus der Zugfestigkeit R_m bestimmen:

$$\tau_{W,s} = f_{W,\tau} \cdot f_{W,\sigma} \cdot R_m \qquad 3.3$$

Dabei gelten für Stahl folgende Größen: Schubwechselfestigkeitsfaktor $f_{W,\tau} = 0{,}577$ und Zugdruckwechselfestigkeitsfaktor $f_{W,\sigma} = 0{,}45$. Damit ergibt sich ein Gesamtfaktor von $f_{W,\tau} \cdot f_{W,\sigma} = 0{,}26$, was deutlich (>10%) von dem in der DIN 743 empfohlenen Wert 0,3 abweicht (vgl. Kapitel 2.1.2.1).

Eine experimentelle Bestimmung der Torsionswechselfestigkeit des ungekerbten Bauteils kann also sinnvoll sein.

Der technologische Größenfaktor $K_{d,m}$ (vergleichbar mit K_1 nach DIN 743) wird bereits in die Zugfestigkeit eingerechnet (Gleichung 3.4). In Gleichung 3.3 wird also die tatsächliche Zugfestigkeit an der Versagensstelle verwendet.

$$R_m = K_{d,m} \cdot K_A \cdot R_{m,N} \qquad 3.4$$

Sofern die Zugfestigkeit aus Werkstoffproben vorliegt, kann diese direkt genutzt werden. Da die Normwerte der Zugfestigkeit $R_{m,N}$ deutlich von der tatsächlichen Zugfestigkeit abweichen können, ist ein Zugversuch oder eine Bestimmung der Zugfestigkeit über die Härte sinnvoll. Der Anisotropiefaktor K_A berücksichtigt die Abweichungen der Festigkeit in Folge der Bearbeitungsrichtung von Walz- oder Schmiedeteilen. Für Gusswerkstoffe und bei mehrachsigen Spannungen sowie Schubspannungen ist dieser 1 zu setzen.

3.3 Torsionswechselfestigkeit des gekerbten Bauteils $T_{WK,t}$

Sofern im Versuch keine rein wechselnde Belastung auf das gekerbte Bauteil aufgebracht wurde, muss die ertragbare Nennspannungsamplitude der Bauteildauerfestigkeit $T_{AK,t}$ unter Berücksichtigung des Mittelspannungsfaktors $K_{AK,t}$ in die Bauteilwechselfestigkeit der Probe $T_{WK,t}$ umgerechnet werden.

$$T_{WK,t} = \frac{T_{AK,t}}{K_{AK,t}} \qquad 3.5$$

Dafür wird zunächst die Mittelspanungsempfindlichkeit M_τ nach Gleichung 3.6 bestimmt. Die werkstoffabhängigen Konstanten a_m und b_m können der FKM-Richtlinie entnommen werden.

$$M_\tau = f_{W,\tau} \cdot a_m \cdot 10^{-3} \cdot \frac{R_{m,N}}{MPa} + b_m \qquad 3.6$$

Mit der Mittelspannungsempfindlichkeit kann schließlich der Mittelspannungsfaktor $K_{AK,t}$ berechnet werden. Da dieser je nach Überlastfall und Spannungsverhältnis unterschiedlich berechnet wird und somit aus einer Vielzahl von Gleichungen gewählt werden muss, soll hier keine Gleichung aufgeführt werden. Die Bestimmung von $K_{AK,t}$ ist dem Kapitel 2.4.2.4 der FKM-Richtlinie zu entnehmen.

4 Zusammenfassung

Im vorliegenden Artikel wurde das Vorgehen zur Bestimmung experimenteller Kerbwirkungszahlen für Wellen und Achsen bei Biege- und Torsionsbelastung auf Basis der DIN 743 dargelegt. Zudem wurde bezugnehmend auf die zuvor genannte Norm die Ermittlung des Einflusses einer Oberflächenverfestigung beschrieben. Weiterhin wurde das Vorgehen zur Bestimmung von Torsionskerbwirkungszahlen basierend auf der FKM-Richtlinie vorgestellt. Unterschiede zwischen den beiden Verfahren wurden aufgezeigt.

5 Symbolverzeichnis

Formelzeichen

d	Bauteildurchmesser
G'	Bezogenes Spannungsgefälle
$K_1(d_{eff})$	Technologischer Größeneinflussfaktor
$K_2(d)$	Geometrischer Größeneinflussfaktor
K_A	Anisotropiefaktor
$K_{AK,t}$	Mittelspannungsfaktor bei Torsion
$K_{F\sigma}$, $K_{F\tau}$	Einflussfaktor der Oberflächenrauheit
$K_{R,\tau}$	Rauheitsfaktor
K_S	Schutzschichtfaktor
K_V	Randschichtfaktor
$K_{WK,t}$	Konstruktionsfaktor bei Torsion
$K_{d,m}$	Technologischer Größenfaktor
$K_{f,t}$	Kerbwirkungszahl für das Bauteil bei Torsion
K_v	Einflussfaktor der Oberflächenverfestigung
K_σ, K_τ	Gesamteinflussfaktor
M_τ	Mittelspannungsempfindlichkeit bei Torsion
$R_{m,N}$	Normwert der Werkstoff-Zugfestigkeit
R_m	Werkstoff-Zugfestigkeit
$T_{AK,t}$	Ertragbare Amplitude der Bauteil-Dauerfestigkeit bei Torsion

$T_{WK,t}$	Bauteilwechselfestigkeit bei Torsion
a_m	Konstante für M_τ
b_m	Konstante für M_τ
$f_{W,\sigma}$	Zugdruckwechselfestigkeitsfaktor
$f_{W,\tau}$	Schubwechselfestigkeitsfaktor
$n_\sigma(d)$	Stützzahl für die Belastung
$n_\sigma(r)$	Stützzahl für die Konstruktion
β_K	Experimentell bestimmte Kerbwirkungszahl
$\beta_\sigma,\ \beta_\tau$	Kerbwirkungszahl
σ_{ADK}, τ_{ADK}	Spannungsamplitude der Bauteildauerfestigkeit für bestimmte Mittelspannung
σ_B	Werkstoff-Zugfestigkeit
σ_{FK}, τ_{FK}	Fließgrenze
σ_W, τ_W	Werkstoffwechselfestigkeit
σ_{WK}, τ_{WK}	Bauteilwechselfestigkeit
$\tau_{W,s}$	Werkstoffwechselfestigkeit für Schubspannung
$\psi_{\sigma K}, \psi_{\tau K}$	Einflussfaktor der Mittelspannungsempfindlichkeit
S	Sicherheit
d	Durchmesser
n	Stützzahl
α	Formzahl

Indizes

$01, 02$	Nullstellen
I, II	Charge I, Charge II
NOV	Nicht oberflächenverfestigt
OV	Oberflächenverfestigt
a	Amplitude
b, t	Biegung, Torsion
m	Mittel-
o	Ober-
u	Unter-
v	Vergleichs-

6 Literatur

/1/ DIN 743, Tragfähigkeitsberechnung von Wellen und Achsen, Deutsche Norm, 2012

/2/ FKM-Richtlinie, Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen. Hrsg: Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM), Frankfurt/Main. 6., überarbeitete Auflage 2012. VDMA Verlag GmbH Frankfurt/Main, 2012

/3/ Hück, M.: Ein verbessertes Verfahren für die Auswertung von Treppenstufenversuchen. Zeitschrift für Werkstofftechnik, Heft 14, SS. 406-417, 1983