

## Prüfung von Ventildedern unter mechanischer und thermischer Belastung



Das Bauteilversagen von Ventildedern kann zu einem Schaden am gesamten Motor führen. Ein neues Prüfverfahren von IABG lässt einen experimentellen Nachweis der Dauerfestigkeit der Federn mit einer sehr guten statistischen Absicherung zu. Um die notwendige hohe Anzahl an Prüfergebnissen zu erreichen, wird ein speziell entwickelter Resonanzprüfstand verwendet.

### AUTOREN



**Dr.-Ing. Steffen Rödling** ist Abteilungsleiter Betriebsfestigkeit, Bauteilversuche und Prüfsysteme im Bereich Tests und Analysen bei der IABG mbH in Ottobrunn.



**Ing. Manfred Hück** ist Spezialist für Betriebsfestigkeit und statistische Methoden im Bereich Tests und Analysen bei der IABG mbH in Ottobrunn.



**Dipl.-Ing. Matthias Decker** ist Ressortleiter Festigkeit, Funktion und Werkstoffe im Bereich Tests und Analysen bei der IABG mbH in Ottobrunn.



**Dipl.-Ing. Sebastian Hoffmann** ist Teamleiter Prüfstandsentwicklung und Qualifikation von Federn und Stabilisatoren im Bereich Tests und Analysen bei der IABG mbH in Ottobrunn.

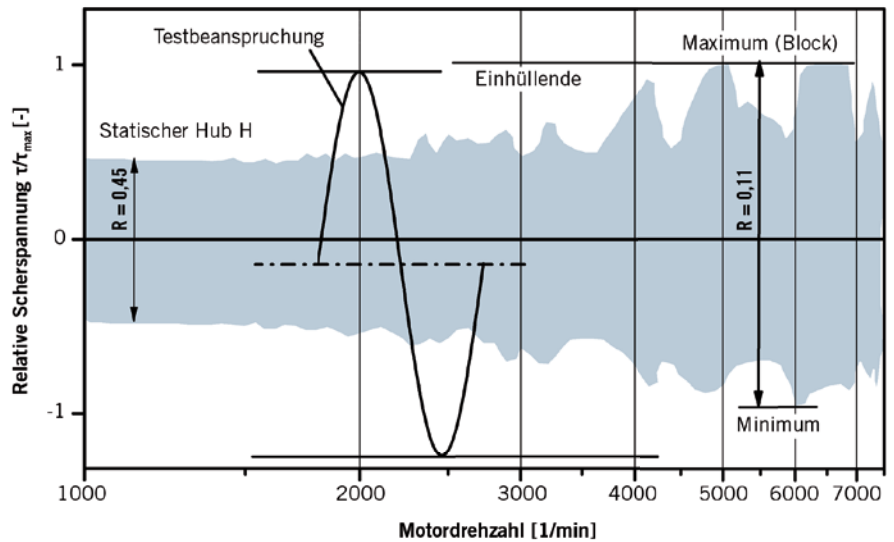
## VERSUCHE UNTER REALISTISCHEN BEDINGUNGEN

Trotz der im Vergleich zum gesamten Motor sehr niedrigen Bauteilkosten ist die Ausfallsicherheit von Ventildedern für den zuverlässigen Betrieb eines Fahrzeugs äußerst wichtig. Da ein Ausfall zu einem Schaden am kompletten Motor führen kann, muss ein Versagen der Ventildedern mit großer Sicherheit ausgeschlossen werden. Hierfür sind zuverlässige Auslegungs- und Absicherungskonzepte für Hersteller von Ventildedern, Motoren und Fahrzeugen von großer Bedeutung. Versuche zur vergleichenden Beurteilung der Schwingfestigkeit von Ventildedern müssen unter möglichst realistischen Bedingungen durchgeführt werden. Für eine zuverlässige Absicherung der Schwingfestigkeit von Ventildedern ist dafür eine große Anzahl von Federn unter frei wählbaren Belastungshöhen idealerweise bis zum Bruch notwendig. Hierfür wurden bei IABG unter Berücksichtigung der Anforderungen der Fahrzeug- und Federnhersteller ein Prüfverfahren sowie die erforderliche Prüftechnik für die Ermittlung der Schwingfestigkeit unter erhöhter Temperatur bei möglichst hohen Frequenzen entwickelt.

## BEANSPRUCHUNG VON VENTILFEDERN

Die Ventildeder ist im Zusammenbau ein von der Nockenwelle angeregtes, schwingfähiges System mit mehreren Freiheitsgraden. Die Anregung des Ventilhubes erfolgt mit einem Signalverlauf ähnlich einer Halbsinusform abschnittsweise während der Steuerzeiten, jeweils unterbrochen durch Phasen, in denen das Ventil geschlossen ist. Wegen der Abweichungen von einer periodischen Sinusschwingung enthält diese Anregung Anteile von Frequenzen deutlich oberhalb der Rotationsfrequenz der Nockenwelle. Durch das breite Frequenzspektrum können überlagerte Längs- oder Querschwingungen in der Ventildeder angeregt werden, die zeitgleich zur Öffnungsbewegung des Ventils auftreten. Auf diese Weise kommt es zu örtlichen Beanspruchungen, die deutlich höher sein können als die der quasistatischen Verformung durch den Ventilhub.

**BILD 1** zeigt schematisch einen typischen Frequenzgang einer Ventildeder im Zylinderkopf, wobei die Einhüllende des



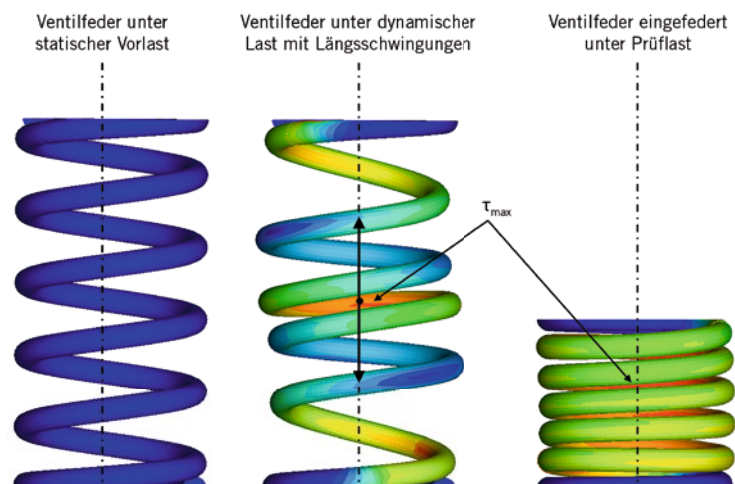
**BILD 1** Typischer Frequenzgang einer Ventildeder [1]

Zeitverlaufs der örtlichen Scherspannung über der Motordrehzahl dargestellt ist. Bis etwa  $n = 1800/\text{min}$  folgt die Verformung der Ventildeder mehr oder weniger exakt dem Nockenhub. Bei höheren Drehzahlen treten Längsschwingungen auf, die zu einer deutlichen Erhöhung der örtlichen Spannungen in der Feder führen. Eine Obergrenze der Verformung ist erreicht, wenn zwei Federwindungen sich berühren (Block). Im realen Motorbetrieb durchläuft die Ventildeder diese Frequenzbereiche immer wieder kurzzeitig und erreicht so nur sehr langsam eine für den Bruch relevante Anzahl der größten Beanspruchungszyklen zwischen absolutem Minimum und absolutem Maximum.

Durch die überlagerten Längsschwingungen (Schwirrschwingungen) können sich im realen Motorbetrieb zwei benachbarte Federwindungen berühren, während die jeweils daran angrenzenden Windungen noch Abstand voneinander haben. Dieser in **BILD 2** in der Mitte dargestellte Schwingungszustand führt trotz der geringen Einfederung in einzelnen Windungen zur maximal möglichen Scherspannung  $\tau_{\text{max}}$  auf der Innenseite der Feder.

## PRÜFSTRATEGIE

Zur dauerhaftesten Auslegung von Ventildedern muss das Ausfallverhalten im Dauerfestigkeitsbereich der Wöhlerlinie



**BILD 2** Beanspruchungssituation einer Ventildeder im Motor und auf dem Prüfstand (geringe Belastung in blau, hohe Belastung in rot)

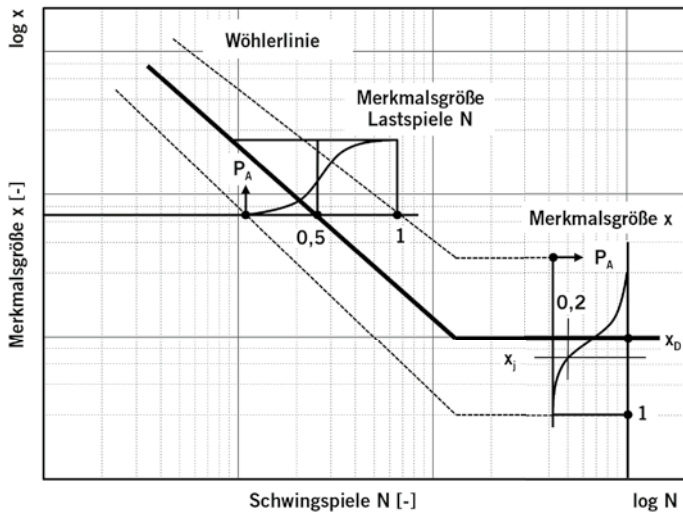


BILD 3 Ausfallwahrscheinlichkeit  $P_A$  im Bereich der Zeit- und Dauerfestigkeit (schematisch)

bekannt sein, BILD 3. Zur Absicherung der Extrapolation für niedrige Ausfallwahrscheinlichkeiten bei hohen Bauteilstückzahlen ist eine große Anzahl von Prüfergebnissen in Form von Brüchen und Durchläufern erforderlich [2].

Da die Ventildfeder im Motorbetrieb aber nur sehr langsam eine für den Bruch relevante Anzahl der größten Beanspruchungszyklen erreicht, ist es nicht sinnvoll, den realen Belastungs-Zeit-Verlauf des Ventilhubes nachzubilden. Ziel einer Prüfung muss es sein, in jeder relevanten Federwindung die maximal mögliche Spannungsamplitude möglichst oft zu erreichen, um durch die so realisierte, zeitlich gerraffte Maximalbeanspruchung eine ausreichende Anzahl an Brüchen zu erhalten. Da

die Anregung der Ventildfeder über die Nockenwelle in einem breiten Frequenzspektrum erfolgt, spielt die erzielte Prüffrequenz aus Sicht der Betriebsfestigkeit [3] keine Rolle – sofern das Erreichen der maximalen Beanspruchung in der Feder gewährleistet ist. Zur effizienten Versuchsführung werden die Versuche daher bei erhöhter Temperatur mit der maximal möglichen Federverformung (bis nahezu Block) und einer möglichst hohen Prüffrequenz durchgeführt, BILD 1 und BILD 2. Um das jeweilige Lastniveau statistisch möglichst gut abzusichern, werden für den Versuch im Probit-Verfahren möglichst viele Federn verwendet. Die statistische Auswertung der Ergebnisse erfolgt über die Logit-Verteilung.

PROBIT-VERFAHREN UND VERTEILUNGSFUNKTION

Das Probit-Verfahren dient zur statistischen Auswertung von Brüchen und Durchläufern im Dauerfestigkeitsbereich einer Wöhlerkurve, BILD 3. Die Wahrscheinlichkeiten für die Anzahl von Brüchen innerhalb einer Stichprobe auf einer definierten Spannungsstufe können statistisch ermittelt und in ein Wahrscheinlichkeitsnetz eingetragen werden [4].

Im Versuch werden so Tests auf mindestens zwei Lastniveaus bei gleicher Mittellast durchgeführt. Die ausgewerteten Versuchspunkte für einen Federtyp können über dem Schwinghub  $H$  in einem Wahrscheinlichkeitsnetz dargestellt werden, BILD 4.

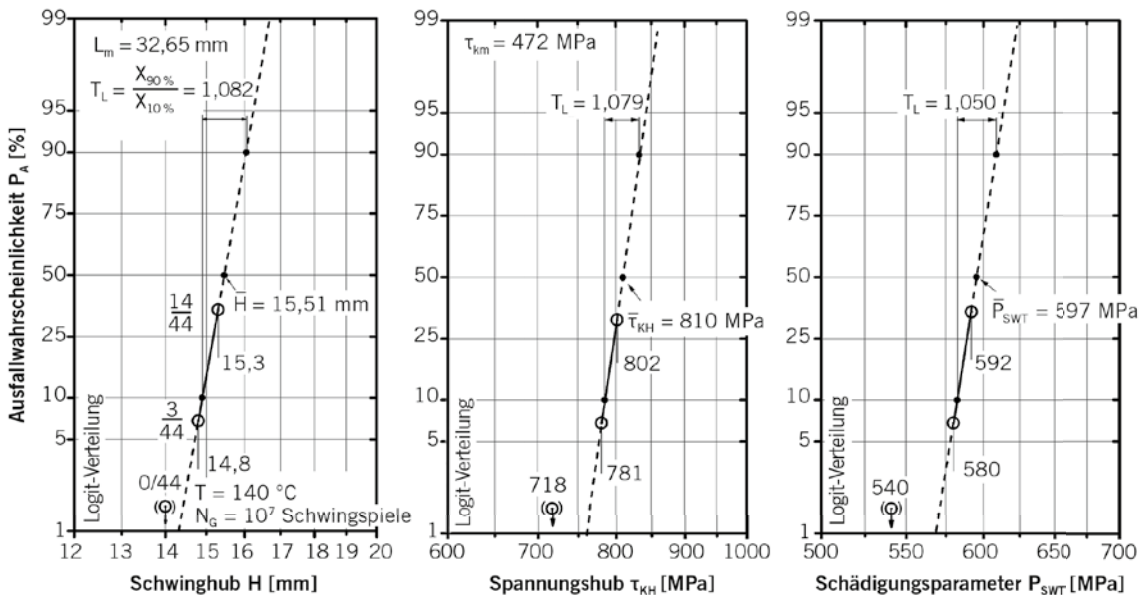


BILD 4 Datenauswertung im Wahrscheinlichkeitsnetz [6]

Der Vergleich verschiedener Federtypen ist durch das Auftragen der Ausfallwahrscheinlichkeiten über der Schwingweite der maximalen Schubspannung  $\tau_{KH}$  möglich. Sollen zusätzlich Versuchsergebnisse bei unterschiedlichen Mittelspannungen verglichen werden, ist eine Auftragung über dem Schädigungsparameter  $P_{SWT}$  nach Smith, Watson und Topper sinnvoll, der die Mittelspannungsempfindlichkeit hochfester Federstähle sehr gut abbildet [5]. Umfangreiche Versuche zeigen, dass sich die Ergebnisse von Festigkeitsuntersuchungen an Ventildedern sehr gut mit der Logit-Verteilung beschreiben lassen [1], die deshalb für die Skalierung der Wahrscheinlichkeitsachse verwendet wird. Die aus den Ergebnissen abgeleitete Ausgleichsgerade gibt den Mittelwert und die Streuspanne der jeweiligen Merkmalsgröße wieder. Über diese beiden Parameter in Verbindung mit der verwendeten Verteilungsfunktion können die Versuchsergebnisse in extrem kompakter Form beschrieben und mit anderen Ergebnissen verglichen werden.

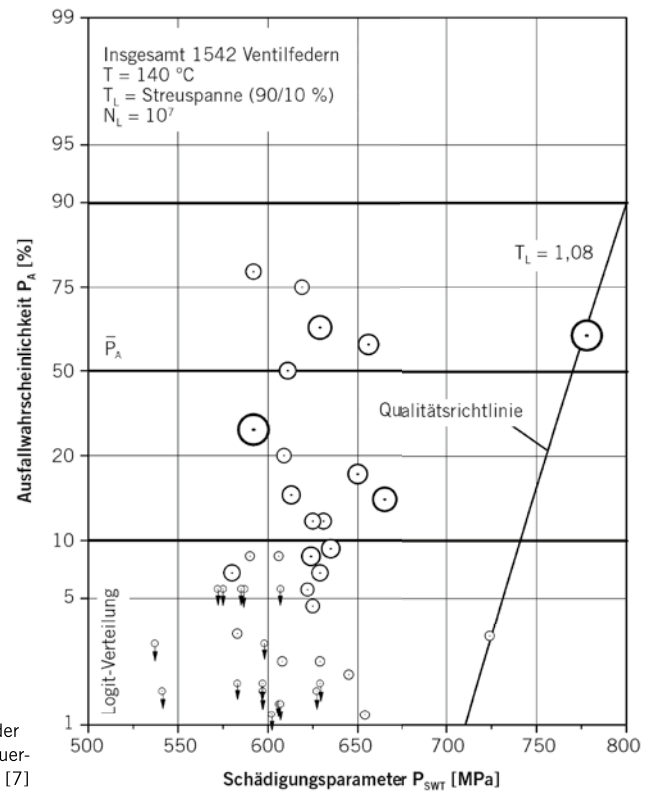
### DAUERFESTIGKEITSVERGLEICH

Bei der IABG wurden umfangreiche Untersuchungen zur Qualifikation der Schwingfestigkeit von Ventildedern bei erhöhter Temperatur durchgeführt und die Ergebnisse statistisch ausgewertet [6, 7, 8]. **BILD 5** zeigt die dabei erzielten Ergebnisse im Wahrscheinlichkeitsnetz der Logit-Verteilung, bewertet über den Schädigungsparameter  $P_{SWT}$ . Die eingetragenen Versuchspunkte sind Ergebnisse mit Ventildedern unterschiedlicher Stahl-, Draht- und Federnhersteller und geben einen Überblick über die erreichbare Qualität bezüglich Dauerfestigkeit und Streuung. Die unterschiedliche Größe der eingetragenen Punkte bezieht sich dabei auf die jeweilige Gewichtung nach der Anzahl der Versuche und der dabei erzielten Brüche.

Die im Diagramm dargestellte Streuung in Form der Ausgleichsgeraden ist für die Bewertung des Werkstoffs im Hinblick auf seine Schwingfestigkeit von Bedeutung. Aus den bei der IABG durchgeführten Versuchsreihen konnte für die besten Ventildedern im Test eine Streuspanne von  $T_{L,90/10} \leq 1,08$  für den Schädigungsparameter  $P_{SWT}$  ermittelt werden. Der Schädigungsparameter  $P_{SWT}$  ist ein Maß für den Einfluss der lokalen Beanspruchungsamplituden und Mittelwerte auf die Schädigung bei veränderlicher Mittelspannung. Um bei den hohen Stückzahlen von Ventildedern eine minimale Ausfallrate zu gewährleisten, ist eine geringe Streuung maßgeblich und wichtiger als eine besonders hohe ertragbare Beanspru-

chung bei einer Ausfallwahrscheinlichkeit von  $P_A = 50\%$  [6].

Das primäre Ziel muss also eine Minimierung der Streuung in der Serie sein, da sich diese stärker auf die mit sehr niedriger Ausfallwahrscheinlichkeit nachgewiesene Beanspruchbarkeit auswirkt als der Mittelwert. Die in **BILD 5** eingezeichnete Ausgleichsgerade stellt den rechten Rand aller im Versuch ermittelten Dauerfestigkeitswerte für Ventildedern dar. Diese obere Grenze wird als aktueller Stand der Technik und zurzeit maximal erreichbare Bauteilqualität gesehen. Die so ermittelte Dauerfestigkeit und die Streuung können als Richtwert einer Qualitätsanforderung für andere Ventildedervarianten verwendet werden.



**BILD 5** Übersicht der Ergebnisse im Dauerfestigkeitsbereich [7]

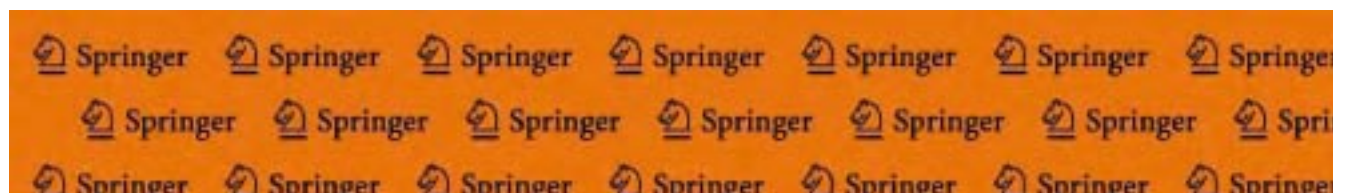




BILD 6 IABG-Resonanzprüfmaschine für Ventildfedern (VSTM)

### PRÜFMASCHINE ZUR PRÜFUNG VON VENTILFEDERN

Zur Berücksichtigung der Anforderungen an die Erprobung wurde bei der IABG ein Resonanzprüfstand zur Qualifizierung von Ventildfedern entwickelt. Zwischen zwei Schwingarmen kann eine große Anzahl von Prüflingen gleichzeitig montiert und getestet werden, BILD 6. Zur Vorspannung der Federn auf eine gewünschte Mittellast wird der obere Schwingarm abgesenkt. Die Schwingarme bilden mit den zu prüfenden Federn ein Feder-Masse-System mit einer charakteristischen Eigenfrequenz. In dieser Eigenfrequenz kann eine Eigenschwingung angeregt und mit sehr geringem Energieaufwand aufrechterhalten werden. Die Schwingung wird am unteren Schwingarm angeregt und die gewünschte Amplitude geregelt. Die als Prüffrequenz verwendete Resonanzfrequenz des schwingfähigen Systems ist dabei abhängig von der Federrate, der Anzahl der zu prüfenden Federn und der Größe der schwingenden Massen. Die Frequenz kann durch Änderung dieser Parameter in bestimmten Grenzen eingestellt werden.

Auf den beiden Prüfplätzen des Prüfstands können je nach Größe und Federrate bis zu 96 Federn gleichzeitig geprüft werden. Beim Bruch einer Feder verändert sich die Steifigkeit des schwingenden Systems und der Prüfstand schaltet auf-

grund der sich ändernden Resonanzfrequenz ab. Zusätzlich kann eine Versuchsführung bei erhöhter Temperatur bis maximal 200 °C realisiert werden, um den Einfluss auf Schwingfestigkeit und Setzverhalten der Ventildfedern zu untersuchen. Durch den vollständigen Massenausgleich kann auf ein aufwendiges Schwingfundament für den Prüfstand verzichtet werden, ohne dass Vibrationen in den Boden eingeleitet werden.

### ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ventildfedern sind in Bezug auf den zuverlässigen Betrieb eines Motors als sicherheitskritisches Bauteil zu bewerten. Da ein Bauteilversagen zum Schaden des gesamten Motors führen kann, wird eine sehr niedrige Ausfallwahrscheinlichkeit gefordert, die im Versuch mit der entsprechenden statistischen Absicherung nachzuweisen ist. Die Ventildfeder ist im Zusammenbau ein von der Nockenwelle angeregt schwingfähiges System. Durch die Anregung treten neben der Frequenz des Nockentriebs auch deutlich höhere Frequenzen in Form von Schwirrschwingungen auf, die die Feder in unterschiedlichen Anregungsbereichen bis auf Block belasten. Die realitätsnahe Prüfung im befeuerten Motor ist wenig sinnvoll, da trotz des immensen Aufwands die schädigenden Lastspiele mit sehr hohem Hub nur selten auftreten. Damit kann eine ausrei-

chende Lastspielzahl mit den maximalen Beanspruchungen nicht dargestellt werden. Aus diesem Grund sollte die Prüfung bei hoher Frequenz und mit dem maximal möglichen Schwinghub mit erhöhter Temperatur durchgeführt werden. Mit dem Probit-Verfahren wird eine Vorgehensweise vorgeschlagen, die einen experimentellen Nachweis der Dauerfestigkeit mit einer sehr guten statistischen Absicherung zulässt. Um die notwendige hohe Anzahl an Prüfergebnissen zu erreichen, wird bei IABG ein hierfür entwickelter Resonanzprüfstand verwendet, der eine energieeffiziente und schnelle Prüfung von sehr vielen Prüflingen unter erhöhter Temperatur erlaubt. Mithilfe des vorgeschlagenen Verfahrens wurden umfangreiche Versuchsergebnisse mit Ventildfedern verschiedener Hersteller erzielt und die relevanten Einflussfaktoren quantifiziert. Die Temperatur als wichtigster Einflussfaktor auf die Dauerfestigkeit und auf das dynamische Setzverhalten wurde in Bezug auf die Ausfallwahrscheinlichkeit qualitativ untersucht. Auf diese Weise konnte auf Basis der großen Versuchsumfänge eine Qualitätsanforderung definiert werden, an der sich die Güte zukünftiger Ventildfedergenerationen messen lassen kann.

### LITERATURHINWEISE

- [1] Hück, M.; Schütz, W.: Qualitätsvorschrift für die Beurteilung der Schwingfestigkeit von Ventildfedern. IABG-Bericht TF-2200, Ottobrunn, 1987
- [2] Radaj, D.; Vormwald, M.: Ermüdungsfestigkeit. Berlin: Springer-Verlag, 2007
- [3] Hück, M.; Schütz, W.: Ein- und mehrstufige Schwingfestigkeitsversuche mit Ultraschall. IABG-Bericht TF-2551, Ottobrunn, 1989
- [4] Hück, M.: Statistik für Ingenieure. TU Clausthal-Zellerfeld, Prof. Dr. H. Zenner, 1991
- [5] Smith, K.N.; Watson, P.; Topper, T.H.: A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals. In: Journal of Materials 1970, Nr. 5, S. 767-778
- [6] Hück, M.; Rödling, S.: Vergleichende experimentelle Untersuchung der Dauerfestigkeit von fünf Ventildfedervarianten. IABG-Bericht TM-1308, Ottobrunn, 2008
- [7] Hück, M.; Rödling, S.: Experimentelle Bewertung der Dauerfestigkeit von Ventildfedern. IABG-Bericht TA34-PB-249/12, Ottobrunn, 2012
- [8] Hück, M.; Schütz, R.: Einfluss der Temperatur auf die Dauerfestigkeit von Ventildfedern. IABG-Bericht TA-3890, Ottobrunn, 2000



DOWNLOAD DES BEITRAGS  
[www.springerprofessional.de/MTZ](http://www.springerprofessional.de/MTZ)



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE  
 order your test issue now:  
[springervieweg-service@springer.com](mailto:springervieweg-service@springer.com)

