



INNOVATIVES BAUTEILPRÜFKONZEPT FÜR KURBELWELLEN

Die Kurbelwelle ist eines der Kernbauteile moderner Verbrennungsmotoren und unterliegt im Betrieb einer komplexen mechanischen Beanspruchung. Die Übergangsradien der Lagerzapfen zu den Kurbelwangen sowie die Austritte der Ölbohrungen zur Schmierung der Haupt- und Hublagerzapfen stellen schwingbruchgefährdete Stellen dar. Deshalb werden an diesen Stellen teils kostenintensive Oberflächenverfestigungsmaßnahmen in den Fertigungsprozess integriert. Um die Untersuchung der Wirksamkeit dieser Maßnahmen in einer Betriebsfestigkeitsprüfung unter möglichst realitätsnaher Beanspruchung zu ermöglichen, hat die IABG mbH ein neues Kurbelwellenprüfkonzert entwickelt.



AUTOREN



DR. JÜRGEN FRÖSCHL
ist Betriebsfestigkeitsexperte,
Bereich Tests und Analysen, bei der
IABG mbH in Ottobrunn.



DIPL.-ING. (FH) FLORIAN ACHATZ
ist Projektleiter für Betriebsfestigkeit,
Funktionsversuche und Prüfstände,
Bereich Tests und Analysen, bei der
IABG mbH in Ottobrunn.



DR. STEFFEN RÖDLING
ist Abteilungsleiter für Betriebs-
festigkeit, Funktionsversuche und
Prüfsysteme, Bereich Tests und
Analysen, bei der IABG mbH
in Ottobrunn.



DIPL.-ING. MATTHIAS DECKER
ist Ressortleiter Versuche Auto-
motive, Bereich Tests und Analysen,
bei der IABG mbH in Ottobrunn.

BAUTEILPRÜFUNG MUSS REALITÄTSNAH SEIN

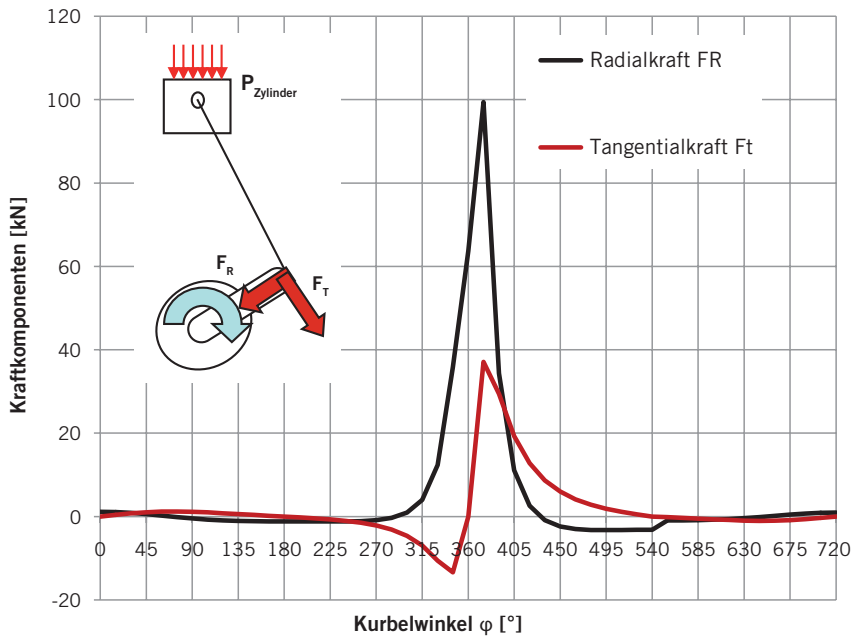
Für eine Bewertung des Betriebsfestigkeitsverhaltens von Bauteilen sind Prüfkonzepte notwendig, welche im Versuch die schwingbruchgefährdeten Stellen möglichst realitätsnah beanspruchen. Existieren an einem Bauteil mehrere verschiedene kritische Bereiche mit jedoch unterschiedlichen Beanspruchungshöhen, so ist zusätzlich durch das Prüfkonzept sicherzustellen, dass die Verhältnisse der Beanspruchungshöhen der einzelnen Zonen ebenso realitätsnah dargestellt werden. Diese Forderung nach einer „schädigungsequivalenten“ Bauteilprüfung zählt zu den wichtigsten Kriterien, die bei einem Vergleich unterschiedlicher Prüfmethoden heranzuziehen sind.

An Kurbelwellen können diese schwingungsrissegefährdeten Bereiche sowohl an den Übergängen (Hohlkehlen) der Kurbelwangen zu den Hub- und Hauptlagerzapfen als auch an den Ölbohrungsein- und -austritten der entsprechenden Zapfen lokalisiert werden. Um die lokale Festigkeit in diesen Zonen zu erhöhen, wird zum Teil ein hoher und damit kostenintensiver fertigungstechnischer Aufwand durch mechanische und/oder thermische Oberflächenverfestigungsverfahren betrieben. Für die Beurteilung, ob einzelne Verfahrensschritte eingespart beziehungsweise durch günstigere, eventuell weniger festigkeitssteigernde Verfahren substituiert werden können, ist gerade bei Kurbelwellen die Forderung nach einer „schädigungsequivalenten“ Prüfung von besonderer Bedeutung.

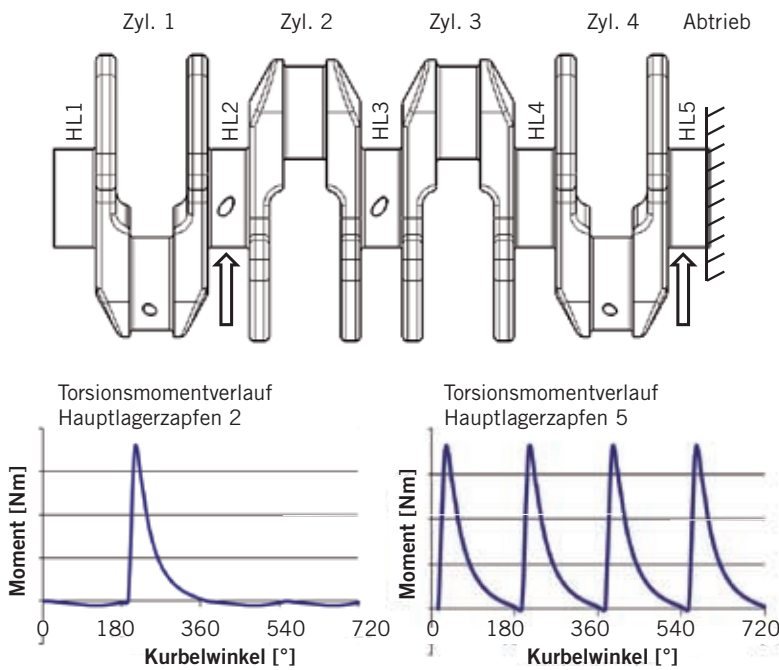
BEANSPRUCHUNGSSITUATION VON KURBELWELLEN

Kurbelwellen unterliegen im Betrieb einer komplexen, zeitlich veränderlichen Beanspruchung. Um diese näher zu betrachten, wird zunächst die äußere Kraftanregung aufgrund der zyklischen Gaskräfte in den einzelnen Zylindern und die daraus resultierende zyklische Beanspruchung der einzelnen Kurbelwellenbereiche betrachtet. Dazu wird ein typisches Modell einer Kurbelwelle eines Vierzylindermotors in Reihenbauweise herangezogen.

Der zeitlich veränderliche Zylinderdruck – bedingt durch den thermodynamischen Arbeitsprozess – führt an den einzelnen Hubzapfen zu einer entsprechenden zyklischen Radial- und Tangentialkraftbelastung, ①. Während sich die Radialkraft im Wesentlichen in den beiden benachbarten Hauptlagern abstützt, wird das aus der Tangentialkraft entstehende Torsionsmoment zur Abtriebsseite der Kurbelwelle hin weitergeleitet. Das aus der Tangentialkraft am Hubzapfen des Zylinders 2 resultierende Torsionsmoment beansprucht somit auch in vollem Umfang die Hauptlagerzapfen der nachfolgenden Zylinder 3 und 4. Die Hauptlagerzapfen 1 und 2 des Zylinders 1 unterliegen jedoch keiner Torsionsbeanspruchung auf Grund des Verbrennungsvorganges in Zylinder 2. Somit erfährt jeder Hauptlagerzapfen im Zuge eines Motorlebens eine unterschiedliche Anzahl an Torsionsmomentschwingspielen, ②. Diesem Umstand sollte daher in einem „schädigungsäquivalenten“ Prüfkonzept Rechnung getragen werden.



1 Schematischer Kraftkomponentenverlauf an einem Kurbelwellenzapfen



2 Schematische Torsionsmomentverläufe in unterschiedlichen Hauptlagerzapfen

Die Kurbelwelle ist aufgrund der mehrfachen Lagerung in den Hauptlagerzapfen statisch überbestimmt. Diese überbestimmte Lagerung lässt eine freie Verformung der Kurbelwelle unter den einwirkenden Lasten nur im Rahmen der Lager Spiele und Lagerstuhlsteifigkeiten zu. Hierdurch wird bei Torsionsbelastung der Kurbelwelle eine Verdrehung sowie Verschiebung der Hauptlagerzapfen senk-

recht zur Rotationsachse behindert. Dies wiederum führt dazu, dass in den Hublagerzapfen keine Torsionsbeanspruchung im eigentlichen Sinne auftritt. Das Torsionsmoment in den Hauptlagerzapfen wird vielmehr durch die Kurbelwangen in eine Querkraftschub- sowie Biegebeanspruchung des Hublagerzapfens transformiert. Erst im nachfolgenden Hauptlagerzapfen tritt wiederum ein Torsionsmoment auf.

Die Radialkraft im Kurbelwellenabschnitt, in dem die Zündung auftritt, führt hauptsächlich zu einer Biegebeanspruchung. In 3 sind die in den einzelnen Kurbelwellenabschnitten auftretenden Hauptbeanspruchungsarten dargestellt. Dabei wird zwischen Hublager-, Hauptlagerzapfen und Kurbelwangen unterschieden. Im befeuerten Motorbetrieb kommt es zusätzlich zu den hier diskutierten Beanspruchungen aus den dynamischen Gaskräften zu Zusatzbeanspruchungen. Diese resultieren aus der Dynamik des Antriebsstrangs sowie aus überlagerten Massenkraften. Sie können in den meisten Prüfkonzepten durch Lastüberhöhung oder auch durch Veränderung des Niveaus der mittleren Prüflast zumindest für die untersuchten schwingbruchkritischen Bereiche der Kurbelwelle berücksichtigt werden.

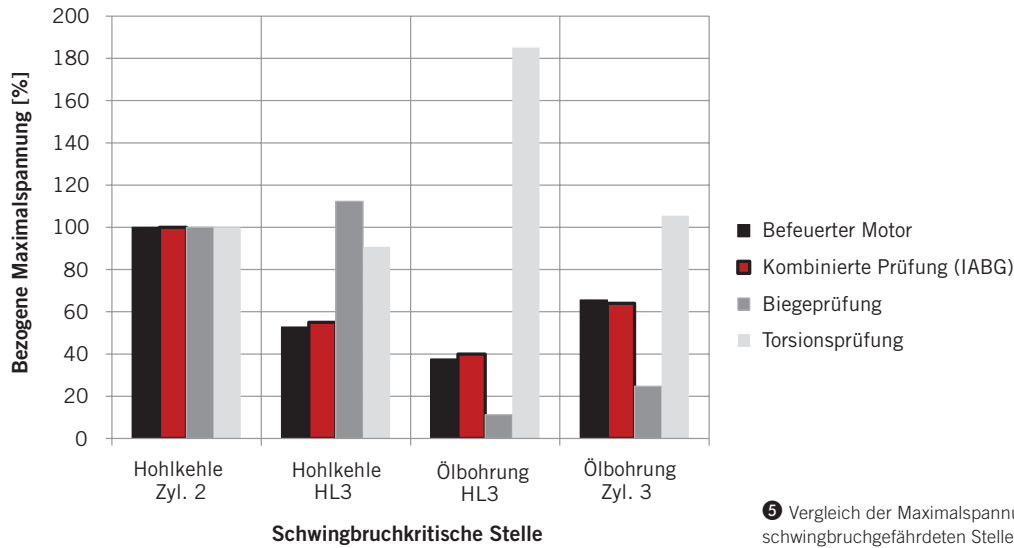
GÄNGIGE PRÜFMETHODEN VON KURBELWELLEN

Zwei gängige Prüfmethode für den experimentellen Betriebsfestigkeitsnachweis von Kurbelwellen stellen die reine Biegeprüfung sowie die reine Torsionsprüfung dar.

Bei der Biegeprüfung werden oftmals einzelne Kurbelwellensegmente so geprüft, dass ein über das Segment unveränderliches zyklisches Biegemoment (meist wechselnd oder schwelend) aufgebracht wird. Wie der nachfolgende rechnerische Vergleich unterschiedlicher Prüfkonzepte zeigt, werden dabei hauptsächlich die Hohlkehlenbereiche der Hub- und Hauptlagerzapfen beansprucht.

Bei der Torsionsprüfung wird oftmals die gesamte Kurbelwelle mit einem wechselnden Torsionsmoment von Wellenende zu Wellenende geprüft. Dabei ist die Kurbelwelle in der Regel an den Hauptlagerzapfen nicht gelagert, so dass sich das Bauteil frei verdrehen kann. Demzufolge tritt das Torsionsmoment über die gesamte Kurbelwellenlänge und damit auch in den Hublagerzapfen auf. Bei dieser Prüfmethode werden dadurch hauptsächlich die Ölbohrungsein- und -austritte beansprucht und untersucht.

Da beide Prüfmethode unterschiedliche schwingbruchgefährdete Stellen der Kurbelwelle untersuchen, müssen für den experimentellen Betriebsfestigkeitsnachweis der gesamten Kurbelwelle in der Regel beide Prüfmethode eingesetzt werden. Durch die prüfkonzeptbedingte Prüflings-



5 Vergleich der Maximalspannung in unterschiedlichen schwingbruchgefährdeten Stellen

ell geprüften, von der Prüfkraft beaufschlagten Kröpfung auftreten wird, bleiben die übrigen Kurbelwellenkröpfungen intakt und für die nachfolgenden Prüfungen verwendbar. Aufgrund der richtigen Abbildung des Tangentialkraftflusses über die abtriebsseitig gelegenen Kurbelwellenbereiche hinweg treten jedoch auch in den nicht durch die Pleuelkraft beaufschlagten Segmenten die Beanspruchungen und etwaige „Vorschädigungen“ realitätsnah auf.

Das Prüfprogramm sieht die Prüfung einer entsprechenden Anzahl von Kurbelwellen vor. Für jede Kurbelwelle erhält man eine der Kröpfungsanzahl entsprechende Anzahl an Versuchsergebnissen. Diese lassen sich sowohl in ihrer Gesamtheit als auch für jede Kröpfung einzeln und damit kröpfungsspezifisch auswerten. Der Einfluss der Beanspruchungen benachbarter Kröpfungen auf Ermüdung und Lebensdauer kann damit gezielt untersucht und ausgewertet werden.

VERGLEICH UNTERSCHIEDLICHER PRÜFKONZEPTE

Um die unterschiedlichen Prüfverfahren vergleichen zu können, werden die lokalen Beanspruchungen an einer generischen Kurbelwelle eines Vierzylindermotors für die folgenden drei Prüfverfahren mithilfe einer FE-Analyse ermittelt:

- : Biegeprüfung
- : Torsionsprüfung
- : IABG-Prüfverfahren mit kombinierter Beanspruchung und realitätsnaher Lagerung.

Die aus den Berechnungen ermittelten lokalen Beanspruchungen werden mit jenen aus einem befeuerten Motorlauf verglichen. Dazu werden die Gasanregungskräfte entsprechend der Zündreihenfolge transient auf die einzelnen Kurbelzapfen aufgebracht. Zusätzliche dynamische Effekte beziehungsweise Massenkräfte werden in diesem Ansatz nicht berücksichtigt. Die hieraus resultierenden Zusatzbeanspruchungen können durch entsprechende Anpassung des Prüflastverlaufes berücksichtigt werden.

Exemplarisch werden die Beanspruchungen in den folgenden Stellen verglichen, die typische schwingbruchgefährdete Bereiche von Kurbelwellen darstellen:

- : Hohlkehle am Kurbelzapfen Zylinder 2
- : Hohlkehle am Hauptlagerzapfen HL3
- : Ölbohrung im Hauptlagerzapfen HL3
- : Ölbohrung am Kurbelzapfen Zylinder 3.

Die Simulation des befeuerten Motorlaufs über zwei Kurbelwellenumdrehungen in ③ (im Diagramm unten) zeigt, dass die maximale Beanspruchung unter den vorliegenden Annahmen an der Hohlkehle des Kurbelzapfens des Zylinders 2 auftritt. Der Ölbohrungsausritt am Hubzapfen des Zylinders 3 wird der zweithöchsten Maximalspannung ausgesetzt. Diese beträgt dabei zirka 66 % der Spannung in der Hohlkehle. Beide Spannungsspitzen treten etwa zum Zeitpunkt der Zündung im Zylinder 2 auf. Wie im Diagramm in ③ zu erkennen ist, führt auch die Zündung in Zylinder 1 zu ausgeprägten Spannungsmaxima. Dabei erfährt die Hohlkehle des Hauptlagerzapfens 3 ihre höchste Beanspruchung.

Für einen Vergleich der drei verschiedenen Prüfmethode mit dem befeuerten Motorlauf werden nun die jeweils berechneten Maximalspannungen in den vier untersuchten schwingbruchkritischen Bereichen ausgewertet und jeweils auf die Maximalspannung in der Hohlkehle des Hubzapfens am Zylinder 2 bezogen, ⑤. Der Vergleich zeigt deutlich, dass bei der reinen Biegeversuchprüfung die Hohlkehle im Hauptlagerzapfen 3 deutlich höher beansprucht wird als im Motorbetrieb, während die beiden Ölbohrungsausritze beziehungsweise -austritte zu niedrig beansprucht werden. Bei Biegeversuchprüfung würde in diesem Beispiel zwar die höchste Beanspruchung wie im befeuerten Motorbetrieb im Hublagerzapfen 2 auftreten, die Ölbohrungen lägen aber auf zu niedrigem Niveau.

Die Torsionsprüfung zeigt eine deutliche Überzeichnung der Spannungen an den beiden Ölbohrungen, die Hohlkehle im Hublagerzapfen HL3 wird dagegen im Vergleich zur Hohlkehle im Hauptlagerzapfen zu gering beansprucht. Hierbei wurde eine schwellende Torsionsbelastung zu Grunde gelegt. Im Falle einer Torsionsprüfung unter wechselnder Belastung würde die deutliche Überhöhung der Ölbohrungsstellen nicht zurückgehen. Auch unter der reinen Torsionsprüfung der gesamten Kurbelwelle treten nicht praxisrelevante Maximalbeanspruchungen auf.

Weder mit einer der vorgestellten klassischen Methoden allein noch mit einer Kombination beider Methoden lassen sich

damit die Beanspruchungen im befeuerten Motorbetrieb ausreichend genau nachbilden. Sollen die Beanspruchungen in der Hohlkehle des Zylinders 2 nachgewiesen werden, müssen jeweils andere Stellen weit höher beansprucht werden als im Motorbetrieb. Hierdurch können in der Prüfung Schwingrisse erzeugt werden, die wegen der prüfstandsbedingten Überbeanspruchung nicht zwingend praxisrelevant sind. Dies kann in diesen Bereichen entweder zu Überdimensionierung beziehungsweise für die Praxis nicht erforderlichen, festigkeitssteigernden Prozessschritten oder zu einer unzureichenden Erprobung der Hohlkehle des Zylinders 2 führen.

Das neue IABG-Prüfkonzept zeigt für alle untersuchten versagenskritischen Stellen der Kurbelwelle eine sehr gute Übereinstimmung der Beanspruchungen mit denen des befeuerten Motorbetriebs. Alle untersuchten Stellen können dabei in einem Prüflauf gleichzeitig praxisgerecht

erprobt werden. Sowohl die geometrische Gestaltung als auch der Einsatz festigkeitssteigernder Maßnahmen können sich damit an den tatsächlichen Bedingungen im befeuerten Motor orientieren. Das vorgestellte Verfahren kann damit einen erheblichen Beitrag zur Vermeidung von Überdimensionierung, zur Einsparung aufwendiger Prozessschritte sowie zum zuverlässigen Betriebsfestigkeitsnachweis für Kurbelwellen leisten.

ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende Beitrag stellt ein neues Prüfkonzept für den experimentellen Betriebsfestigkeitsnachweis von Kurbelwellen vor. Dabei wird die Prüfkraft wie im realen Motorbetrieb direkt auf jeden einzelnen Hubzapfen aufgebracht. Die daraus resultierende Radial- und Tangentialkraftbelastung führt zu einer sehr realitätsnahen Beanspruchung der versagenskritischen Bereiche der Kurbelwelle. Ein

rechnerischer Vergleich zwischen einem Motorlauf, den zwei gängigen Prüfverfahren der Biege- und Torsionsprüfung sowie der neuen IABG-Prüfmethode zeigt die deutlichen Vorteile. Der bisher übliche Betriebsfestigkeitsnachweis für Kurbelwellen mit zwei getrennten Prüfmethoden kann durch die neue IABG-Prüfmethode ersetzt werden, wobei die örtlichen Beanspruchungen deutlich realitätsnäher nachgebildet werden. So können Leichtbaupotenziale besser ausgeschöpft sowie potenzielle Kostenreduzierungsmaßnahmen in der Kurbelwellenfertigung bewertet werden.



DOWNLOAD DES BEITRAGS
www.MTZonline.de



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
order your test issue now:
SpringerAutomotive@abo-service.info

JETZT ONLINE-LESEPROBE STARTEN:
www.MTZonline.de/leseprobe/mtz