

MTZ

04 März 2015 | 76. Jahrgang

Sonderdruck / Offprint

aus / from MTZ 04|2015

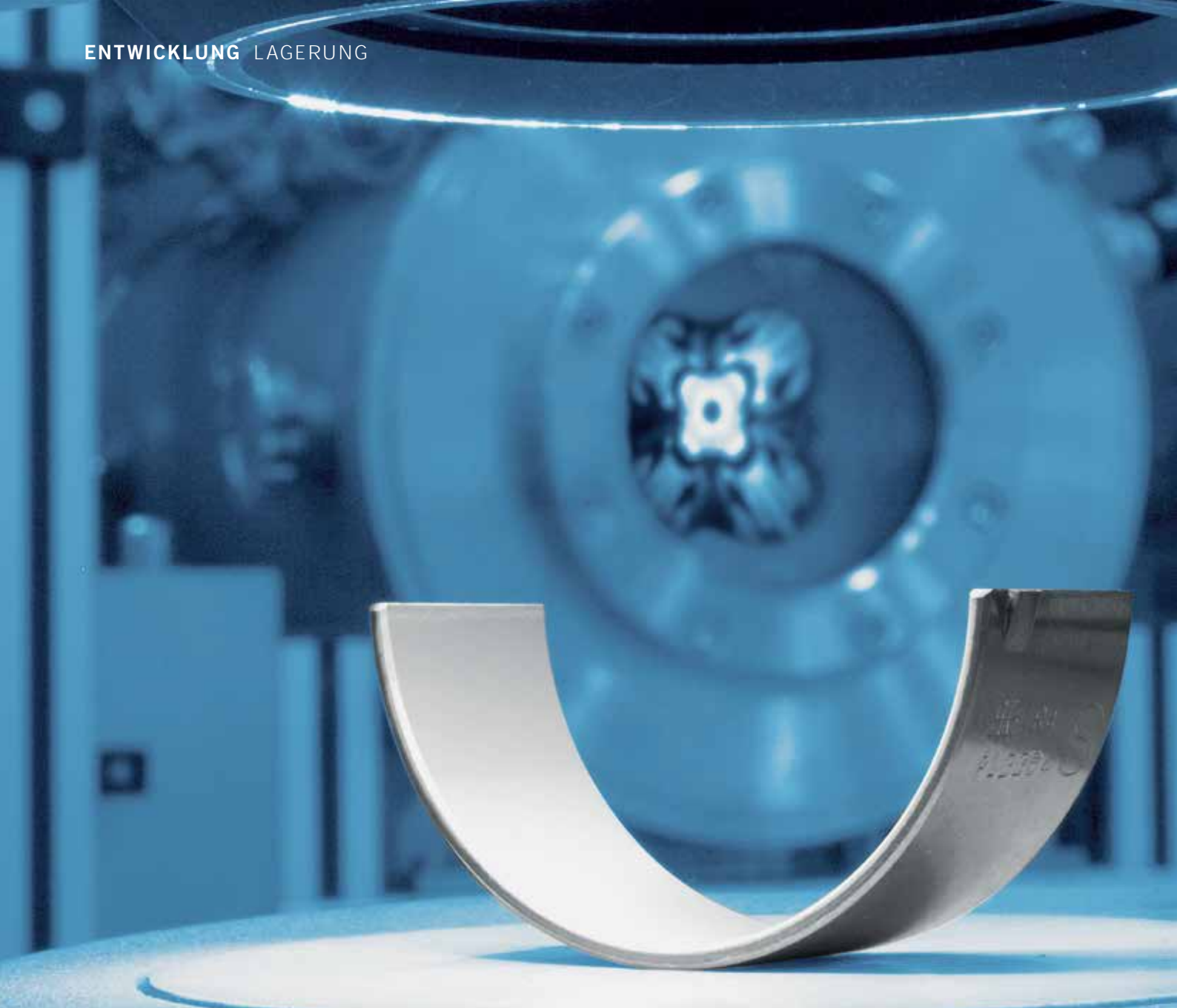
Springer Vieweg

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH



**SPUTTERLAGER FÜR
HOCHAUFGELADENE DIESELMOTOREN**

**SPUTTER BEARINGS FOR
HIGHLY CHARGED DIESEL ENGINES**



STETIGER ANSTIEG DER LEISTUNGSDICHTE BEI DIESELMOTOREN

Der Dieselmotor ist in Europa als Antrieb in Personenkraftwagen äußerst beliebt. So wird in Deutschland annähernd jeder zweite neue Pkw von einem Dieselmotor angetrieben [1], was nicht zuletzt zur Erreichung des gesetzlichen Flottenverbrauchslimits von 95 g CO₂/km im Jahr 2020 beiträgt. Innovationen bei der Kraftstoffeinspritz- und der Aufladetechnik haben die Kenndaten von Dieselmotoren auf das heutige Niveau getrieben. **BILD 1** veranschaulicht die Entwicklung der Leistungsdichte, ausgehend von circa 20 kW/l

bei Saugmotoren in den 1980er-Jahren. Die Kombination von Direkteinspritzung (DI) und Monoturboauflader mit variabler Turbinengeometrie (VTG) ermöglicht heute Leistungsdichten von 50 bis 80 kW/l. Durch den Einsatz von Mehrfach-Turboaufladungskonzepten sind Leistungsdichten von 100 kW/l erreichbar, und dank neuer Aufladetechnologien, wie die der elektrogetriebenen Strömungsverdichter (E-Turbo), werden sich diese bei kommenden Dieselmotorgenerationen noch weiter steigern lassen.

Diese beeindruckende Anhebung der Leistungsdichte konnte jedoch nur gelingen, indem alle im Energiefluss befindlichen mechanischen Komponenten eben-

falls weiterentwickelt wurden. Dabei standen insbesondere die stangenseitigen Pleuellagerschalen im Fokus, da diese von allen innermotorischen Gleitlagern die höchste Belastung erfahren. Waren bei Saugmotoren vor einigen Jahren hierfür noch Lagerschalen aus bleihaltigem Bronzelegermaterial mit ebenfalls bleihaltigen, galvanisch abgeschiedenen Laufschichten ausreichend, so mussten für Dieselmotoren mit Turboaufladung und später mit Direkteinspritzung gänzlich neue Schichtsysteme für Gleitlager entwickelt werden: Anfang der 1980er-Jahre setzten einige wenige Gleitlagerhersteller erstmals einen Sputterprozess zur Großserienbeschichtung von Pleuellagern für Dieselmotoren

Sputterlager für hochaufgeladene Dieselmotoren

Durch die Einführung des Direkt-einspritzverfahrens und der Turboaufladung hat sich die spezifische Leistung von Pkw-Dieselmotoren in den vergangenen drei Jahrzehnten verfünffacht. Insbesondere getrieben durch neue Aufladungskonzepte wird sich dieser Trend auch in Zukunft fortsetzen. Damit werden auch die dynamischen Belastungen der Pleuellager in Dieselmotoren weiter zunehmen. Eine innovative Sputterlagergeneration von Pleuenschmidt, basierend auf einer Direkt-sputterbeschichtung, trägt dieser Entwicklung Rechnung.

AUTOREN



Dr. Klaus Damm
ist Leiter des Bereichs
Anwendungstechnik und Qualität
bei der KS Gleitlager GmbH
in St. Leon-Rot.



Dr. Klaus Pucher
ist Leiter des Bereichs
Forschung und Entwicklung
bei der KS Gleitlager GmbH
in St. Leon-Rot.



Athanassios Skiadas
ist Leiter der Abteilung
Anwendungstechnik – motorische
Gleitlager und Simulation
bei der KS Gleitlager GmbH
in St. Leon-Rot.



Mario Witt
ist Leiter der Abteilung
Tribologie und Prüfung
bei der KS Gleitlager GmbH
in St. Leon-Rot.

ein. Mit der Ratifizierung der EU-Altauto-richtlinie Anfang des Jahrtausends musste die Sputtertechnologie auf bleifreie Lagermaterialien umgestellt werden. Heute verfügen weltweit nur wenige Hersteller über die zur Großserienfertigung von Sputterlagern notwendige Prozesstechnologie.

KOMBINATION VON MESSING-LAGERMATERIAL UND DIREKT-GESPUTTERTER LAUFSCHICHT

Konventionelle bleifreie Sputterlager, deren Aufbau in **BILD 2** (links) schematisch dargestellt ist, basieren auf einer Kupferlegierung als Lagermaterial. Sie werden als Stahl-Verbund-Werkstoff zu

einer Lagerschale umgeformt, ihre endbearbeitete Lauffläche wird mittels Sputterverfahren mit einer 10 bis 20 µm dicken Aluminiumlegierung beschichtet. Um diesen Schichtverbund aus niedriglegierten Kupferlegierungen (zum Beispiel Bronzen mit 4 bis 8 % Zinn) und zinnhaltigen Aluminiumlegierungen (zum Beispiel AlSn20Cu1) thermisch zu stabilisieren, muss eine Diffusionssperre zwischen Lagermaterial und Lauffschicht eingebracht werden [2]. Die hierfür in der Regel eingesetzten Nickel- oder Nickel-Chrom-Zwischenschichten weisen allerdings ein sehr ungünstiges Fressverhalten gegenüber der Stahlwelle auf, was die Robustheit (etwa bezüglich Kantentrag

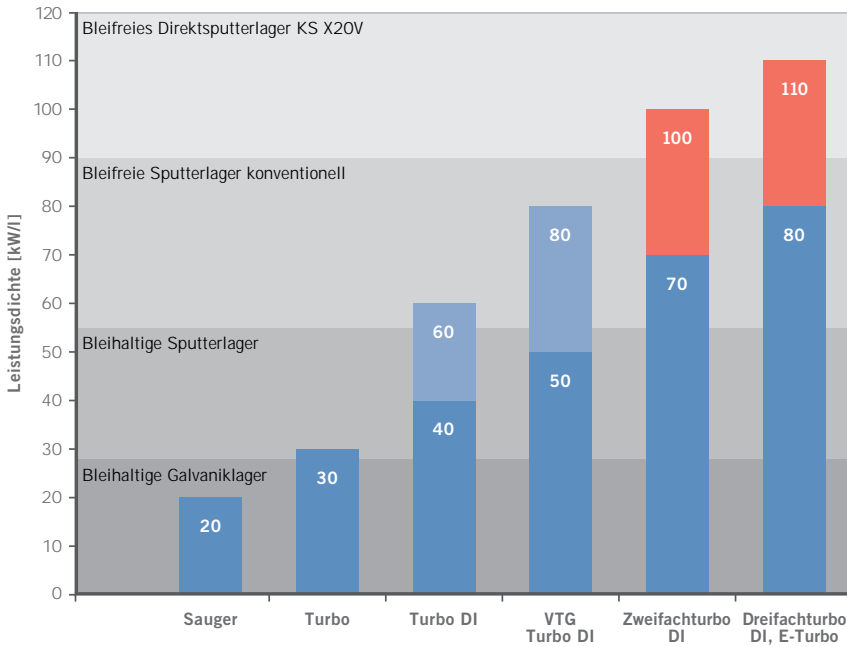


BILD 1 Leistungsdichte unterschiedlicher Dieselmotorenbauarten und die dafür geeigneten Pleuellager-Schichtsysteme

oder Fremdpartikelverträglichkeit) von konventionellen Sputterlagern limitiert. Deshalb beschreitet Kolbenschmidt bei dem patentierten Gleitlagerkonzept KS X20V neue Wege:

- Durch die Verwendung einer gegossenen Sondermessinglegierung (CuZn20Al2Mn2Ni2Fe1) als Lagermaterial kann auf eine Diffusionsperre vollständig verzichtet und damit die Sputterlaufschicht direkt

auf das Lagermaterial abgeschieden werden, **BILD 2** (rechts). Dies hat den Vorteil, dass der Welle über die gesamte Motorlebensdauer ein tribologisch optimaler Reibpartner zur Verfügung steht. Dies gilt auch bei erhöhtem Kantentrag und bei einer möglichen Laufschichtbeschädigung durch Fremdpartikel, womit eine hohe Robustheit der Lagerstelle gewährleistet ist.

- Des Weiteren kommt als Laufschicht eine deutlich höher legierte Aluminiumlegierung (AlSn25Cu2.5) zum Einsatz, deren Zinnweichphasenanteil gegenüber herkömmlichen Sputterschichten um 25 % erhöht wurde, was sich positiv auf die Fresssicherheit auswirkt. Aufgrund des 2,5-fachen Kupfergehalts und der damit verbundenen größeren mechanischen Festigkeit zeigt sich diese Sputterschicht sowohl höher belastbar als auch verschleißfester. Anzumerken bleibt, dass durch die Legierungsbestandteile Al, Mn und Ni das Sondermessing ein günstiges Korrosionsverhalten in Hinblick auf die Verwendung von Biokraftstoffen und den Einsatz niederviskoser Motorenöle mit neuartigen Additivsystemen aufweist [3].

SPUTTERLAGER IM VERGLEICH ZU ANDEREN LAUFSCICHTSYSTEMEN

Ein speziell bei Kolbenschmidt entwickeltes Lagerprüfstandskonzept dient zur motornahen Erprobung von Gleitlagerwerkstoffen [4]. Mit diesem werden die Lagerfunktionen Fresssicherheit, Anpassungsfähigkeit, Partikelverträglichkeit, Verschleißfestigkeit und Belastbarkeit ermittelt.

Im Fressstest mit 15 m/s Gleitgeschwindigkeit wird eine statische Last stufenweise bis zum Fressen des Gleitlagers erhöht. **BILD 3** zeigt einen Vergleich der Fresssicherheit von unterschiedlichen Schichtsystemen (stets auf kupferbasiertem Lagermaterial) für ein Standardmotorenöl SAE 5W30 und ein niedrigviskoses Motorenöl SAE 0W20 (HTHS 2,6). Durch den Einsatz von niedrigviskosen Ölen steigt der Mischreibungsanteil, damit sinkt bei allen Schichtsystemen die Fresssicherheit. Im Vergleich zu konventionellen Sputterschichten zeigt KS X20V mit beiden Motorenölen eine um 10 % höhere Fresssicherheit, was auf den erhöhten Zinnweichphasenanteil zurückzuführen ist. Galvanikschichten haben aufgrund der geringeren Temperaturbeständigkeit sogar eine um 20 % geringere Fresssicherheit. Die niedrigste Fresssicherheit und den stärksten Abfall beim Übergang von der Viskositätsklasse 5W30 zu 0W20 zeigen die Polymerschichten. Beim Vergleich der Lagertemperaturen fällt auf, dass diese bei polymeren Laufschichten stets um 10 bis 15 °C höher liegen als bei metallischen Laufschichten. Offensichtlich erzeugt die schlechte Wärmeleitung des Polymers

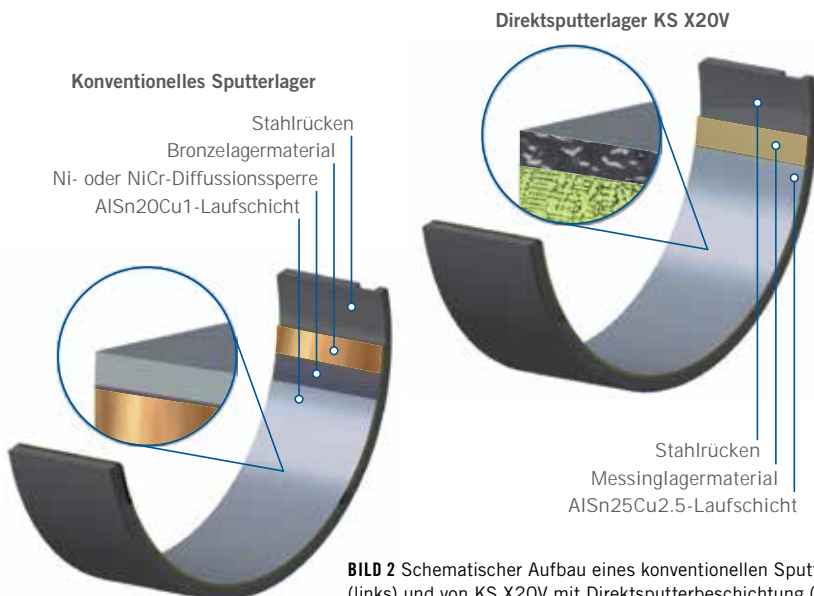


BILD 2 Schematischer Aufbau eines konventionellen Sputterlagers (links) und von KS X20V mit Direktsputterbeschichtung (rechts)

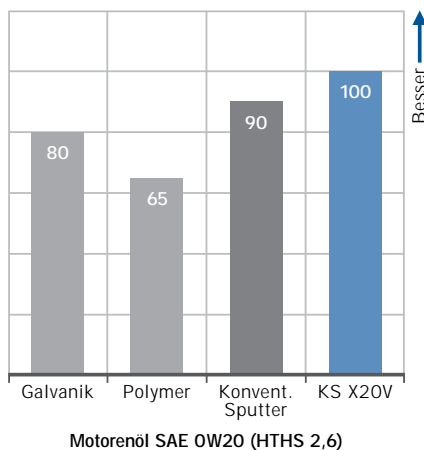
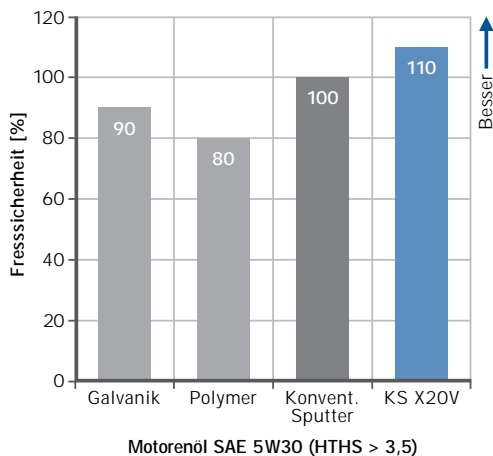


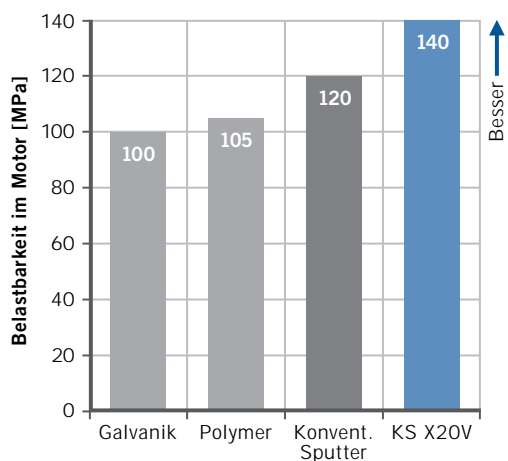
BILD 3 Fresssicherheit unterschiedlicher Schichtsysteme in Abhängigkeit vom Motorenöl

Wie in **BILD 5** (links) dargestellt, wird dabei das Zweistofflager deckelseitig und das Sputterlager stangenseitig verbaut. Dies resultiert aus der unterschiedlichen dynamischen Belastung der beiden Lagerschalen, welche heutzutage mittels elasto-hydrodynamischer Simulationen (EHD-Simulation) ermittelt werden.

BILD 5 (rechts) zeigt beispielhaft das Ergebnis einer solchen EHD-Simulation: Resultierend aus den Massenkräften erfährt die deckelseitige Lagerschale beim Gaswechsel-OT (oberer Totpunkt) ihre maximale Belastung. Allerdings ist diese um ein Vielfaches niedriger als die maximale Belastung der stangenseitigen Lagerschale beim Zünd-OT. Deshalb kann auf der Deckelseite das Zweistofflager KS R25 eingesetzt werden, welches durch seine ausgezeichnete Einbettfähigkeit für Fremdpartikel und Anpassungsfähigkeit die Robustheit des gesamten Pleuellagersystems deutlich erhöht.

Neben dem Zünddruck beeinflusst auch die dimensionale Auslegung (Lagerdurchmesser und -breite) die maximale Belastung des Pleuellagers wesentlich. Aber auch die Ölviskosität, die Wellenqualität und die elastische Vorformung von Pleuel und Welle müssen berücksichtigt werden. Ausgehend von einem modernen Dieselmotorenkonzept, welches reiboptimierte Lagerdimensionierung, Pleuel- und Kurbelwellenleichtbau, niedrige Ölviskosität und hohen Zünddruck vereint, stellt man fest, dass konventionelle Sputterlager im Bereich einer Leistungsdichte von circa 90 kW/l an ihre Leistungsgrenze stoßen, **BILD 1**.

In **BILD 6** sind die maximalen Leistungsdichten der Dieselmotoren europäischer OEMs in Bezug auf das Jahr des Produktionsstarts dargestellt [6]. Für den Zeitraum 2005 bis heute konnten die maximalen spezifischen Belastungen der stangenseitigen Pleuellager anhand der bekannten Auslegungsdaten ermittelt werden. Auch wenn diese Daten für zukünftige Motorenkonzepte noch nicht vorliegen, so kann man bereits heute ein weiteres Ansteigen der spezifischen Pleuellagerbelastung prognostizieren, welche über den Leistungsbereich konventioneller Sputterlager hinausgeht. Mit einer Belastbarkeit von 140 MPa



Sputterlager mit 120 MPa eine deutlich höhere Belastbarkeit als Galvanik- oder Polymerlager mit 100 beziehungsweise 105 MPa. Die Kombination eines Messinglagermaterials und der hochlegierten Direktsputterschicht bei KS X20V weist mit 140 MPa die mit Abstand höchste Belastbarkeit aller am Markt verfügbaren Pleuellagerwerkstoffe auf.

Im Dauerlaufstest mit 120 MPa wird nach 2,5·10⁷ Lastwechseln der Pleuellagerverschleiß bestimmt, **BILD 4** (unten). Nach diesem Lebensdauerstest zeigen die Galvanik- und Polymerschichten durch die hohe dynamische Belastung Oberflächenzerrüttung. Der damit einhergehende erosive Abtrag resultiert in einer um 20 beziehungsweise 25 % niedrigeren Verschleißfestigkeit gegenüber konventionellen Sputterschichten. Dagegen ist die Verschleißfestigkeit von KS X20V in diesem Lebensdauerstest um 30 % erhöht, was durch den 2,5-fachen Kupfergehalt und der damit verbundenen hohen mechanischen Festigkeit der Direktsputterschicht begründet ist.

Infolge der sehr hohen Belastbarkeit von Sputterschichten können deutlich höhere Schichtdicken realisiert werden, damit ergibt sich eine bessere Partikelverträglichkeit im Vergleich zu Galvanik- und Polymerschichten. Bei KS X20V wird diese Eigenschaft durch den Verzicht auf die sehr harten Nickel- oder Nickel-Chrom-Zwischenschichten weiter verbessert.

EINSATZ ALS PLEUELLAGER HOCHBELASTETER DIESELMOTOREN

Im Pleuellager moderner Dieselmotoren kommt das Direktsputterlager KS X20V stets als Halbschalenkombination mit dem Zweistofflager KS R25 zum Einsatz.

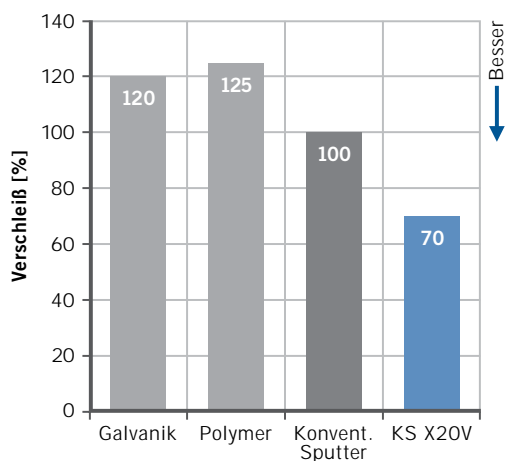


BILD 4 Belastbarkeit (oben) und Pleuellagerverschleiß (unten) unterschiedlicher Schichtsysteme

einen Wärmestau im Lager, der die Fresssicherheit markant reduziert.

Bei der im Dauerlaufstest nach 2,5·10⁷ Lastwechseln (Hochfrequenzpulsator) ermittelten Belastbarkeitsgrenze, **BILD 4** (oben), haben bereits konventionelle

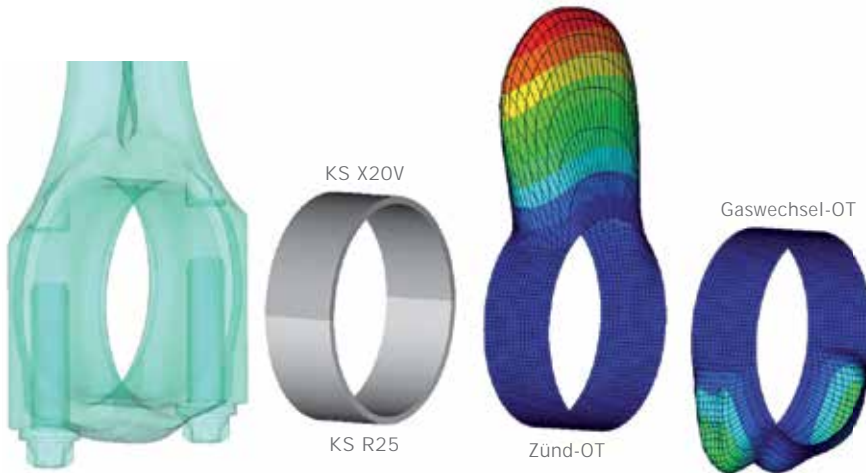


BILD 5 Simulation der dynamischen Belastung der stangen- und deckelseitigen Pleuellagerschalen (geringe Belastung blau, hohe Belastung rot)

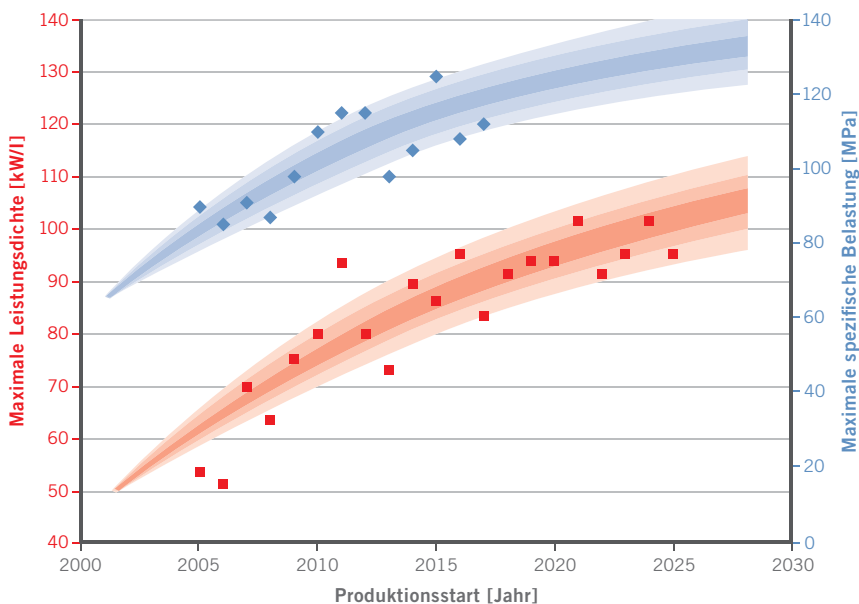


BILD 6 Trend der maximalen Leistungsdichte und der maximalen spezifischen Pleuellagerbelastung

eignet sich das Direktsputterlager KS X20V einerseits für diesen Hochleistungsbereich. Andererseits ermöglicht es auch eine reiboptimale Dimensionierung des Pleuellagers bei Volumenmotoren mit niedrigeren Leistungsdichten. Damit erlaubt es den Motorentwicklern auch in den kommenden Jahren eine konsequente Weiterentwicklung des Dieselmotors in Bezug auf Leistungsfähigkeit und Effizienz.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Direktsputterlager KS X20V wurde für hochbelastete Pleuellager moderner Dieselmotoren entwickelt. Aufgrund seiner sehr hohen dynamischen Belastbarkeit von 140 MPa ist es für kommende Dieselmotoren generationen, deren Aufladungskonzepte (zum Beispiel E-Turbo) die Leistungsdichte und damit auch die

Pleuellagerbelastung weiter erhöhen werden, besonders geeignet. Das Direktsputterlager kombiniert zudem eine hohe dynamische Belastbarkeit mit hoher Fresssicherheit sowie niedrigem Verschleiß. Es ermöglicht so einen deutlich größeren Gestaltungsspielraum bei der reiboptimierten Auslegung des Grundmotors. Die Paarung aus dem Direktsputterlager KS X20V auf der Stangenseite mit dem deckelseitig verbauten Zweistofflager KS R25 garantiert eine hohe Robustheit der Pleuellagerung auch bei ungünstigen Betriebsbedingungen, wie Kantentrag oder Verunreinigungen mit Restschmutz, und damit eine zuverlässige und langlebige Funktion.

Nachdem KS X20V in den vergangenen Jahren erfolgreich in die Großserie überführt werden konnte, wird neben der Weiterentwicklung des Direktsputterlagerkonzepts momentan die Möglichkeiten zur Anwendung dieser Technologie bei Hochleistungs-Ottomotoren untersucht, die bereits heute in Kleinserie Leistungsdichten von 130 kW/l erreichen.

LITERATURHINWEISE

- [1] Zulassungsstatistik des Kraftfahrtbundesamts (www.kba.de)
- [2] Damm, K.; Höne, W.; Reinicke, R.; Skiadas, A.: Gleitlager im Automobil. Verlag Moderne Industrie, 2009, S. 46 ff.
- [3] Dies, K.: Kupfer- und Kupferlegierungen in der Technik. Springer-Verlag, 1967, S. 344 ff.
- [4] Damm, K.; Skiadas, A.; Witt, M.; Schwarze, H.: Gleitlagererprobung anhand der Forderungen des Automobilmarkts. In: ATZextra „100 Jahre Kolbenschmidt Pierburg“, 2010, S. 54-63
- [5] Berg, M.; Skiadas, A.; Schubert, W.: Ölkreislauf von Verbrennungsmotoren II. Expert-Verlag, 2007, S. 146 ff.
- [6] Analyse auf Basis IHS-Motorendatenbank (www.ihs.com)



DOWNLOAD DES BEITRAGS
www.springerprofessional.de/MTZ



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
 order your test issue now:
springervieweg-service@springer.com



Ich bin das K und das S.

Ich bin das P und das G.

Ich bin das A und das O Ihres Motors.

Wenn wir Kolben und Pumpen, Ventile und Gleitlager entwickeln, dann tun wir das mit Herzblut. Ihr Antrieb ist unser Motor. Und Ihre Herausforderungen sind unser Ansporn, Sie mit maßgeschneiderten, innovativen Komponenten zu versorgen. Bei Kolbenschmidt, Pierburg und Motorservice arbeiten wir an der Mobilität der Zukunft. Nicht im Alleingang, sondern gemeinsam mit Ihnen.*

*** UNSER HERZ SCHLÄGT FÜR IHREN ANTRIEB.**

 KOLBENSCHMIDT

 PIERBURG

 MOTORSERVICE

KSPG
Automotive

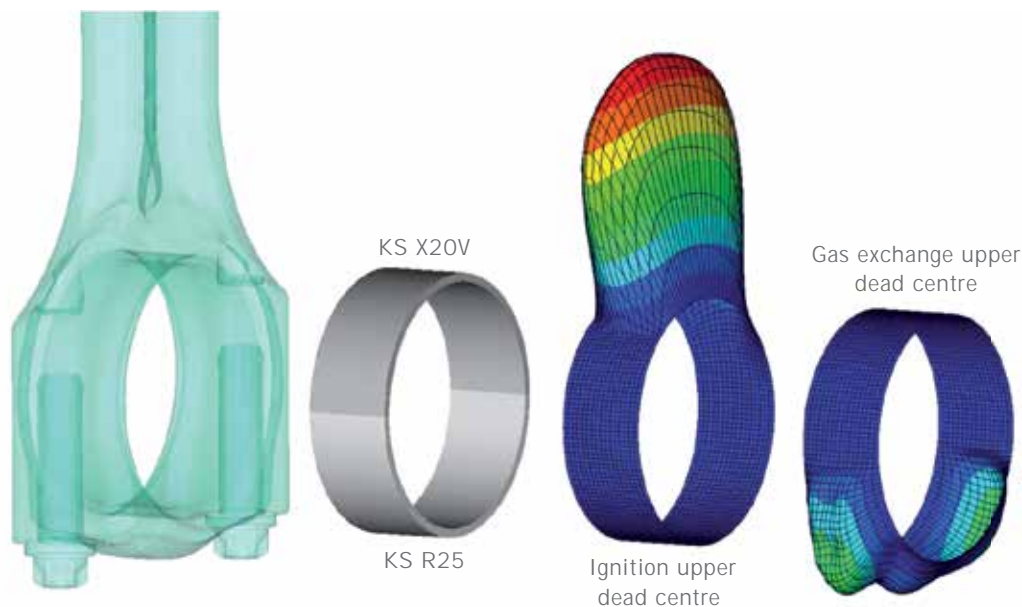


FIGURE 5 Simulation of the dynamic load on con-rod bearing shells on the upper and lower position (low stress blue, high stress red)

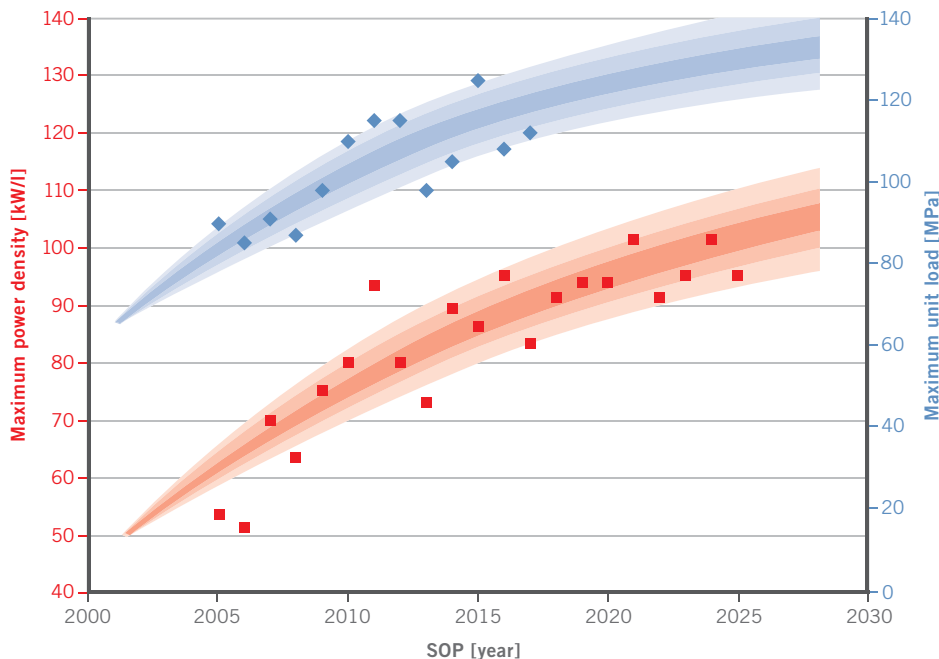


FIGURE 6 Trend in maximum power density and maximum rod bearing unit load

it is especially well suited to future generations of diesel engines whose turbo-charger concepts (e.g. e-turbo) will lead to a further increase in power density and, with it, higher load for the con-rod bearings. The direct sputter bearing combines a high dynamic load capability with a high degree of seizure resistance as well as low wear, thus enabling significantly greater freedom of action in the low-friction design of the basic engine. Coupling the KS X20V direct sputter bearing on the rod side with the KS R25 bi-metal bearing on the cap side of a diesel con-rod guar-

antees a highly robust system which even under unfavourable operating conditions such as edge loading or contamination with foreign particles, gives a reliable and long life-time function.

With the KS X20V bearing having successfully entered large-scale series production in recent years, engineers, besides working to enhance the direct sputter concept, are now examining possibilities for applying this technology in high-performance gasoline engines, which, manufactured in small production series, already reach a power density of 130 kW/l.

REFERENCES

[1] Registration statistics of the Federal Motor Vehicles Office (www.kba.de)
 [2] Damm, K.; Hone, W.; Reinicke, R.; Skiadas, A.: Gleitlager im Automobil. Publisher Moderne Industrie (2009), pp. 46 ff.
 [3] Dies, K.: Kupfer- und Kupferlegierungen in der Technik. Publisher Springer (1967), pp. 344 ff.
 [4] Damm, K.; Skiadas, A.; Witt, M.; Schwarze, H.: Gleitlagererprobung anhand der Forderungen des Automobilmarkts. In: ATZextra „100 Jahre Kolben-schmidt Pierburg“, 2010, pp. 54-63
 [5] Berg, M.; Skiadas, A.; Schubert, W.: Ölkreislauf von Verbrennungsmotoren II. Publisher expert (2007), pp. 146 ff.
 [6] Analysis based on HIS engine data base (www.ihs.com)