

Einleitung

Zwar ist zu erwarten, dass der Verbrennungsmotor die Automobillandschaft auch noch im nächsten Jahrzehnt beherrschen wird, jedoch entsteht aufgrund der zunehmenden Diskrepanz zwischen Energieverbrauch und verfügbaren Ressourcen sowie immer strengeren Grenzwerten für CO₂-Emissionen eine steigende Nachfrage nach der Verbesserung bestehender Fahrzeugtechnologien und der Entwicklung von reibungsreduzierten, energieeffizienteren, „grüneren“ Alternativen. Gleichzeitig treiben die durch ein gesteigertes Umweltbewusstsein immer strengeren Vorschriften für Fahrzeugemissionen technologische Entwicklungen voran.

Benzin- und Dieselerbrennungsmotoren unterscheiden sich beträchtlich hinsichtlich Kraftstoffverbrauch und Emissionen (Bild 1).

Der Benzinmotor zeichnet sich aufgrund seiner hochwirksamen Abgasnachbehandlung durch Schadstoffarmut aus. Jedoch verfügt der Ottomotor über einen geringeren thermodynamischen

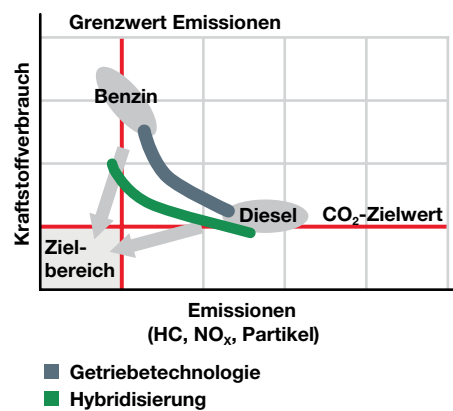


Bild 1 Kraftstoffverbrauch/Emissionen

Wirkungsgrad und verbraucht somit vergleichsweise viel Kraftstoff.

Der Dieselmotor kann dagegen aufgrund seines günstigen thermodynamischen Wirkungsgrades und vorteilhaften Drehmomentverhaltens im Bereich niedriger Drehzahlen eindeutig als verbrauchsgünstig eingestuft werden. Dies kommt dem Trend hin zum Downsizing zur weiteren Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs entgegen.

Allerdings entstehen beim Dieselmotor hohe Abgasemissionen in Form von Kohlenwasserstoffen, Stickoxiden und Rußpartikeln.

Aufladung

Um die steigende Nachfrage nach energieeffizienteren, schadstoffarmen Fahrzeugen zu erfüllen, fordern die Hersteller von Aufladesystemen für Personenkraftwagen und Nutzfahrzeuge kompaktere, leistungsfähigere Systeme, die dazu noch langlebig und bezahlbar sein müssen.

Eine Aufladung – sei es durch Turbolader, sei es durch Kompressoren – ermöglicht dem Motor durch die Zufuhr größerer Sauerstoffmengen in die Zylinder die Verbrennung von mehr Kraftstoff. Somit erhöht sich die Motorleistung erheblich.

Bei der Aufladung handelt es sich um eine der wichtigsten Technologien für das Downsizing von Motoren, welches bei kleinem Hubraum eine Leistung vergleichbar einem größeren Saugmotor liefert. Dies unterstützt den Trend zum Downsizing, welches erhöhte Drehmomente bei niedrigeren Drehzahlen liefert. Die weitere Verbesserung des thermodynamischen Wirkungsgrades und die Minderung der Reibung bei hoher spezifischer Belastung sind die zugrundeliegenden Ziele.

Turbolader

Bei einem Turbolader handelt es sich um ein System, das die aus dem Motor austretende Abgasenergie dazu nutzt, die dem Motor zugeführte Luft zu verdichten.

Das Herzstück eines Turboladers ist eine drehende Welle, über die zwei Räder, ein Turbinenrad und ein Verdichterrad, miteinander verbunden sind. Die drehende Welle stützt sich über ein Lagersystem im Gehäuse ab.

Das Turbinenrad wird im Abgasstrom des Verbrennungsmotors angeordnet; das Abgas aus den Zylindern strömt durch die Turbinenschaufeln und treibt die Turbine an. Je mehr Abgas durch die Schaufeln strömt, desto mehr Leistung wird vom Abgas auf den Rotor übertragen.

Das Verdichterrad wird im Lufteintritt vor den Zylindern positioniert und durch die Drehung der Welle wird Druckluft, also eine größere Menge an Sauerstoff, in den Verbrennungskreislauf eingeführt.

Üblicherweise werden in Turboladern Systeme von Gleitlagern eingesetzt. Dabei wird die Welle – und damit Turbinen- und Verdichterrad – durch dünne Schmierfilme getragen. Dies ermöglicht zum einen grundsätzlich die Rotation, aber auch die Stabilität des Systems bei den auftretenden, sehr hohen Drehzahlen.

Die Vorteile von Turboladern mit Kugellagern im Vergleich zu jenen mit herkömmlichen Gleitlagern ergeben sich nun aus den unterschiedlichen Reibmechanismen. Anstelle eines dünnen, stark gescherten Ölfilms zwischen den relativ zueinander bewegten Oberflächen treten nun einige Wälzkörper, was die Reibung stark verringert. Bei Motor-Betriebstemperatur ist die Reibungsminderung mit typischerweise bis zu 50 % schon deutlich, in den ersten Minuten nach dem Kaltstart noch wesentlich signifikanter (Bild 2).

Eine durch erhöhte Reibung reduzierte Drehzahl von Turbine und Verdichterrad führt zu einer schlechteren Versorgung der Zylinder mit verdichtetem Frischgas. In der Folge ergeben sich neben einer verringerten

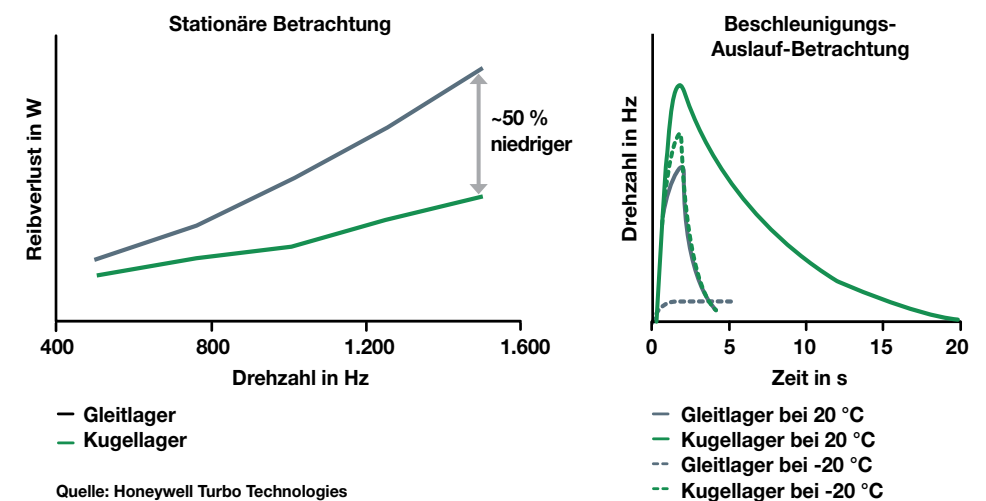


Bild 2 Vorteile des Reibmechanismus von Kugellagern



Bild 3 Schaeffler Kugellager für Turbolader

ten Leistungsfähigkeit des Motors auch erhöhte Rohemissionen.

Bei Turboladern mit Kugellagern bedeutet die grundlegende Änderung des Reibungsmechanismus, dass der Durchfluss des Abgases auch beim Kaltstart ausreichend ist, um für eine genügende Drehung der Welle zu sorgen; somit kann das Verdichterrad die erforderliche Ladeluft direkt in das Motorsystem einleiten. Dies führt zu einem energieeffizienteren System mit geringeren Emissionen, was

für den Fahrer zudem ein höheres Motor Drehmoment von Beginn der Fahrt an bedeutet. In Untersuchungen von Turboladern hat sich gezeigt, dass der „Kugellagereffekt“ bei niedrigeren Motordrehzahlen deutlicher ist, also genau dort, wo ein Downsizing- oder Downsizing-Konzept die größte Unterstützung durch das Turboladersystem benötigt. Für den Motorbetrieb führt die niedrigere Lagerreibung zu höheren Turboladerdrehzahlen unter den genannten niedrigeren Motordrehzahlbedingungen. Insbesondere bei einer plötzlichen Lastanforderung aus dem Leerlauf oder unter niedrigen Lastbedingungen führt die höhere Turboladerdrehzahl aufgrund der Fähigkeit des Turboladers, sofort Druckluft zuzuführen, zu einer deutlichen Verbesserung des Motoransprechverhaltens. Hierbei ist nicht nur die Möglichkeit zur Vermeidung eines Turbolochs beeindruckend, sondern auch die Verbesserung der Emissionsqualität durch die verbesserte Versorgung mit Frischluft.

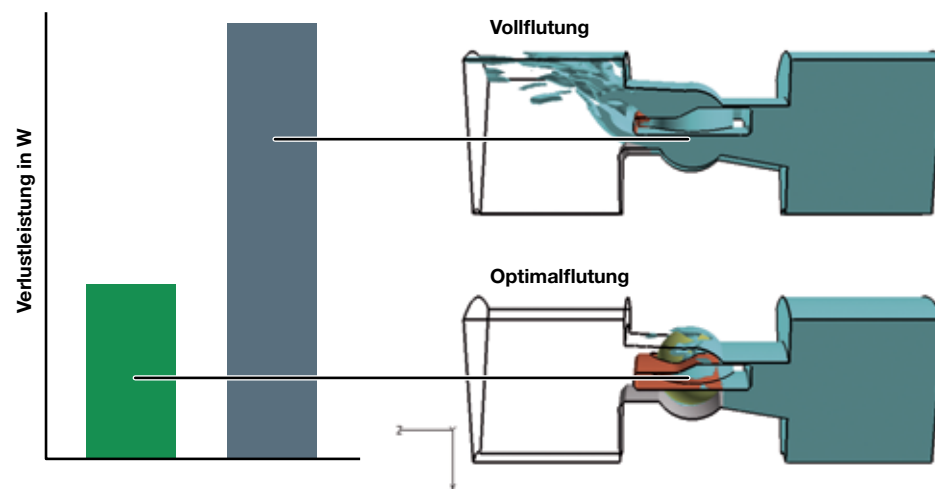


Bild 4 Reibverlust bei unterschiedlichen Schmierbedingungen

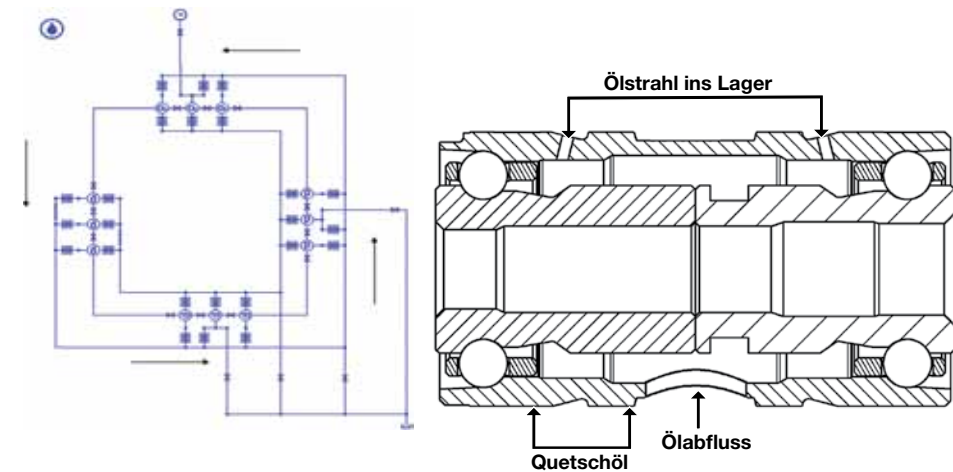


Bild 5 1-D-CFD-Simulation des Ölweges (links); Lagerquerschnitt mit Ölführung (rechts)

Schaeffler Kugellager für Turbolader

Bei den Schaeffler Kugellagern für Turbolader (Bild 3) handelt es sich um zweireihige Schrägkugellager. Typischerweise bestehen diese Lager aus Keramikugeln, zwei Käfigen, einem Außenring mit einer Verdrehsicherung, einem verdichterseitigen Innenring, einem turbinenseitigen Innenring sowie aus Öldüsen und -nuten für Schmierung, Kühlung und Zuführung von Öl zu den sogenannten Quetschöldämpfern.

Kugellager für Turbolader drehen sich mit sehr hohen Umdrehungsgeschwindigkeiten. Bei der Betrachtung des üblichen typischen Drehzahlkennwertes von Lagern unter Berücksichtigung des Durchmessers und der Umdrehungsgeschwindigkeit ($n \cdot d_m$) zeigt sich, dass Turboladerlager sechsmal schneller laufen als alle anderen Lager im Kraftfahrzeug. Ihr Drehzahlkennwert erreicht die Spitzenwerte von Flugzeugtriebwerken und Textilmaschinen. Für diese hohen Drehzahlen sind die Anforderungen an die Schmier-

stoffversorgung anspruchsvoll: Es muss immer genügend Schmierstoff – vor allem auch zur Lagerkühlung – zur Verfügung stehen. Allerdings kann ein Überfluss an Schmiermittel schnell zu beträchtlichen Planschverlusten führen (Bild 4). Dieser Aspekt war bei der Gestaltung der inneren Flächen und Bauteilgeometrien der Schaeffler Kugellager sowie der Käfige von wesentlicher Bedeutung.

Da es sich bei dem Kugellager um ein einzelnes Bauteil eines größeren Systems handelt, ist eine genauere Betrachtung des Gesamtsystems und der darin auftretenden Wechselwirkungen erforderlich.

Die Ölversorgung des Turboladers (Bild 5) muss neben der Schmierung und Kühlung der Kugellager-Reihen auch für die Versorgung der Quetschöldämpfer sorgen. Diese trennen die Oberflächen von Lageraußenring und Gehäuse und dämpfen die Relativbewegung zwischen ihnen; damit werden eine akustische Entkopplung sowie die rotordynamische Stabilisierung begünstigt.

Der gesamte Schmiermittelweg und die erforderliche Ölverteilung werden entsprechend den Leistungsanforderungen für den gesamten Temperaturbereich simuliert und optimiert.

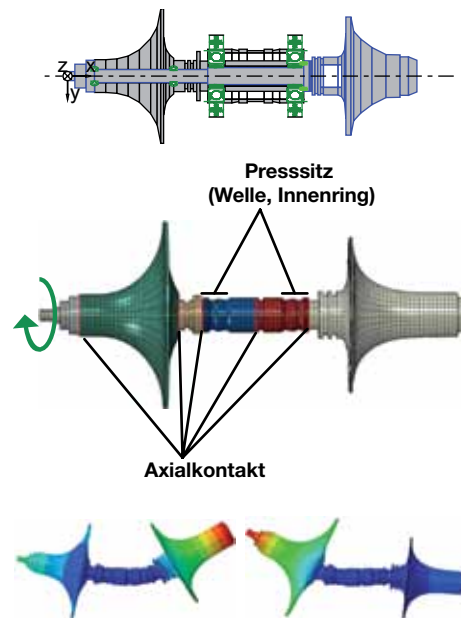


Bild 6 Bearinx-Modell, Mehrkörperstruktur, Eigenformen

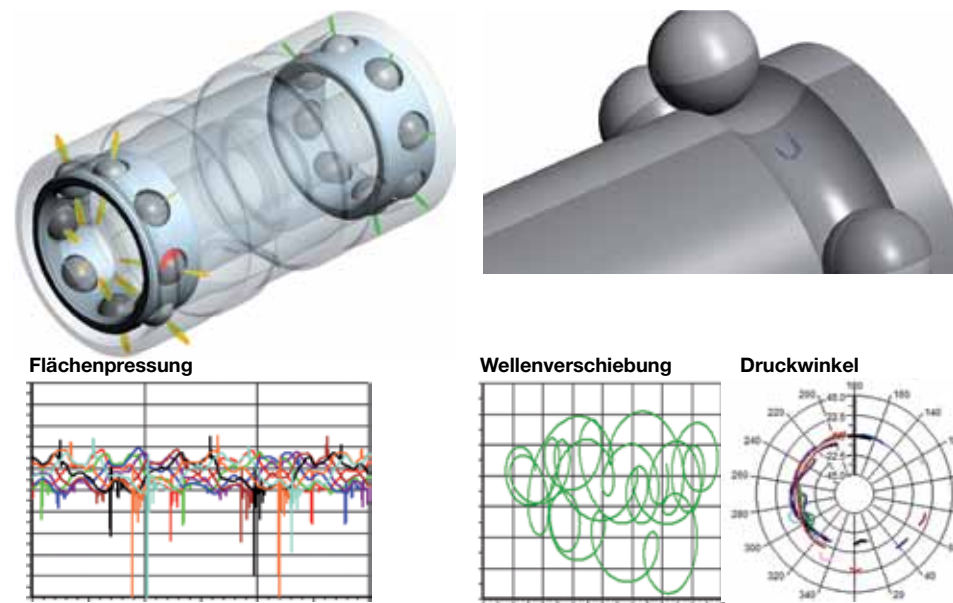


Bild 7 Ergebnisse der Wälzlagersimulation mit der Software „CABA 3D“ von Schaeffler

Ein Kugellager stellt im Sinne eines mechanischen Systems eine Reihe von Elastizitäten mit bekannter Steifigkeit dar. Sobald sie aber mit der Welle und dem Gehäuse des Turboladers verbunden sind und sich dann mit hoher Geschwindigkeit drehen, müssen die Lagereigenschaften auf das System abgestimmt sein.

Umgekehrt müssen die dynamischen Eigenschaften des Systems bei der Lagerauslegung berücksichtigt werden. Die auf das Lager einwirkende Radiallast entsteht aus der Restunwucht des Rotors in Verbindung mit den Eigenschaften des Quetschfilms sowie der Steifigkeit der Welle und den Trägheitseigenschaften der Räder. Dies kann bei sehr hohen Drehzahlen, die bekanntermaßen eine kritische Wirkung auf die Welledurchbiegung haben, Schäden an der Lagerkonstruktion verursachen, welche die Kinematik beeinträchtigen und damit die Lebensdauer des Systems reduzieren (Bild 6). Die Axiallastkomponente entsteht durch Gaskräfte auf Verdichter- und Turbinenrad.

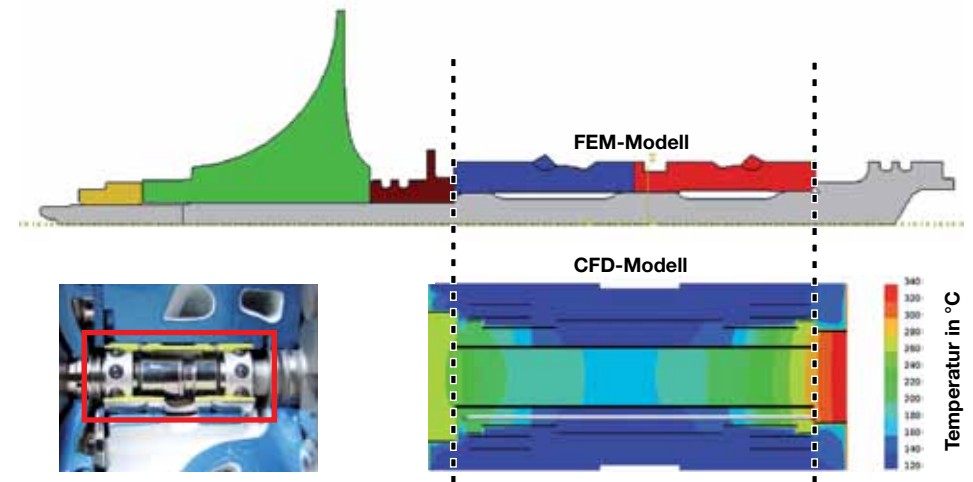


Bild 8 Kombinierte FEM-CFD-Wärmeanalyse

Die Untersuchung der Umdrehungsgeschwindigkeiten und Modalformen bei verschiedenen Betriebstemperaturen und Lasten ermöglicht ein besseres Verständnis der inneren Kinematik des Lagersystems an sich.

Die Bewegung der Kugeln und ihr Zusammenspiel mit den Laufbahnen und Käfigen stehen in sehr komplexer Beziehung zueinander. Unter Verwendung von speziellen Simulationswerkzeugen wie CABA 3D von Schaeffler, das für die Anforderungen von Lageruntersuchungen entwickelt wurde, kann diese Bewegung berechnet werden (Bild 7). Damit stehen genaue Ergebnisse zum Vorhandensein, dem Ort, der Ausdehnung und der Beanspruchung in jedem einzelnen Kontakt zwischen den Lagerkomponenten zur Verfügung. Diese vielfältigen Ergebnisse führen kombiniert mit der entsprechenden Erfahrung zu einem tiefen Lagerverständnis. Somit kann das Lagersystem im Hinblick auf optimale Leistung, Reibungsminderung, Lebensdauer und Werkstoffeignung bewertet und angepasst werden.

Turbolader müssen auch bei extremen Temperaturen funktionieren. Der Kaltstart

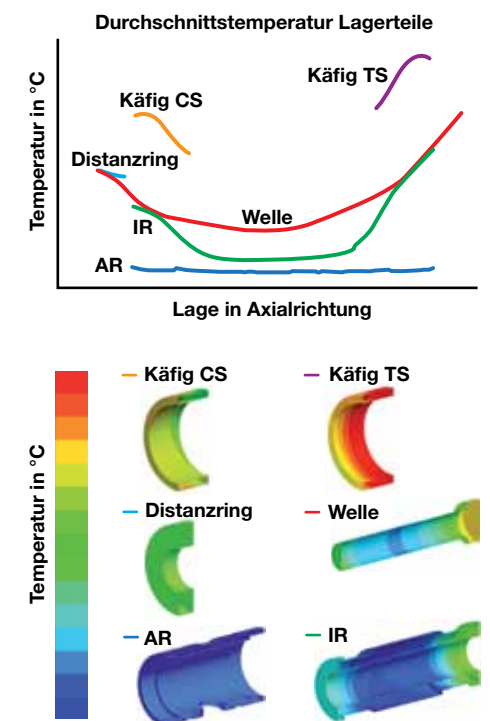


Bild 9 Temperaturprofile in den Lagerteilen

wurde in Bezug auf Reibungsreduzierung bereits betrachtet. Als nächstes sollen die Heißlaufanforderungen untersucht werden. Das Turbinenrad wird von den Abgasen des Verbrennungsmotors angetrieben und ist den Abgastemperaturen ausgesetzt. Im normalen Fahrzyklus wird dieser Wärmeeintrag im Wesentlichen mit dem Ölvolumenstrom durch das Lager abgeführt.

Kritisch ist die Wärmeentwicklung beim Abstellen des heißen Motors, weil die Wärmeabfuhr durch den Schmierstoff unterbrochen ist.

Im normalen Betrieb entstehen im Bereich des Lagers Temperaturen um die 300 °C auf der Turbinenseite, wogegen diese Lager bei Motorabschaltung sogar bis zu 400 °C erreichen können.

Mit Hilfe der numerischen Strömungsberechnung (CFD) sowie der Strukturanalyse (FEM) (Bild 8) kann die Wärmeverteilung (Bild 9) sowie die thermische Ausdehnung verschiedener Bauteile von Rotor und Lagerung bestimmt werden.

Bei diesen Bauteilen sind erhebliche Temperaturunterschiede zu verzeichnen, deren Folgen für die Auslegung der Lagerkomponenten berücksichtigt werden müssen. Das Lagersystem muss extreme Temperaturen und extreme Drehzahlen

aushalten, um einen langen Turboladerbetrieb zu gewährleisten. Daher ist eine genaue Abstimmung der Anwendungsumgebung und eine sorgfältige Werkstoffauswahl von Bedeutung.

Ausblick

Das Jahr 2014 ist für Schaeffler ein wichtiger Meilenstein für das Kugellager in Turboladeranwendungen.

Schaeffler ist seit zehn Jahren führend in der Entwicklung und Herstellung von reibungsarmen doppelreihigen Schrägkugellagern für die Turbolader-Technologie. Im Laufe der Zeit hat das Unternehmen seine Anwendungsanalyse, Konstruktionswerkzeuge und Fertigungsverfahren optimiert. Diese Präzisionskugellager haben bedeutend zur Definition eines neuen Turbolader-Leistungsbenchmarks insbesondere im Bereich der Personalfahrzeuge, Klein- und Schwerlasten beigetragen. In diesem Jahr wird das einmillionste Kugellager für Turboladeranwendungen in die Automobilindustrie geliefert.