

Die Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile: Das Forschungscluster „Low Friction Powertrain“

In heutigen Fahrzeugantrieben geht ein großer Teil der im Kraftstoff gespeicherten Energie durch die Reibung mechanischer Teile in Motor und Getriebe verloren. Um rund zwölf Prozent ließe sich der Kraftstoffverbrauch senken, wenn alle technischen Optimierungsmöglichkeiten ausgeschöpft werden. Das entspräche allein in Deutschland einer Verringerung der CO₂-Emission aus dem Straßenverkehr von etwa 18 Millionen Tonnen pro Jahr. Dies ergab ein Verbundforschungsvorhaben der Forschungsvereinigungen für Antriebstechnik und für Verbrennungskraftmaschinen.

Auf den antiken Philosophen Aristoteles geht die Weisheit zurück, dass das Ganze mehr als die Summe seiner Teile ist. Dies haben sich die Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) und die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) zu Herzen genommen, als sie gemeinsame Sache machten, um die Reibungsverluste in Motor und Getriebe zu minimieren. Das Ziel stand von Anfang an fest: 30 Prozent weniger Reibung sollte der Antriebsstrang der Zukunft aufweisen.

Bislang haben Motoren- und Getriebe-Entwickler meist Einzelkomponenten unter den vorgegebenen Anforderungen an Funktion, Leistung, Lebensdauer und Kosten so verbrauchsgünstig wie möglich ausgelegt. Dieses Vorgehen stößt jedoch immer häufiger an Grenzen, weil sich die Systeme gegenseitig beeinflussen.

Der von FVA und FVV verfolgte neue Ansatz lautet deshalb, die Optimierungsarbeiten nicht mehr singular, sondern im Kontext des Gesamtsystems Antriebsstrang durchzuführen. Zu diesem Zweck wurden im interdisziplinären Clustervorhaben „Low Friction Powertrain“ systemübergreifende Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz im Antriebsstrang auf Basis von Einzelmaßnahmen an Komponenten erarbeitet. Jede Einzelmaßnahme wurde anhand eines virtuellen Gesamtfahrzeuges anschließend darauf überprüft, inwieweit sie tatsächlich zur Verbrauchsminderung beiträgt. Insgesamt 18 Forschungsteams an Hochschulen in Aachen, Clausthal, Hannover, Kaiserslautern, Kassel und München arbeiteten hierbei eng zusammen.

Virtueller Technologieträger

Um die Einsparpotenziale der Forschungsergebnisse aus allen Teilprojekten des Clusterprojekts quantifizieren zu können, stand der Aufbau eines Simulationsmodells für den gesamten Antriebsstrang im Zentrum des Programms. Mit diesem neu entwickelten Modell lassen sich Versuche im virtuellen Raum durchführen. Abhängig von der Rechnerleistung können die Versuche in einer Simulationsumgebung auch im Zeitraffer gefahren werden. Durch eine einfache Variation der Parameter lassen sich schnell und kostengünstig verschiedene Prüfbedingungen abbilden.

Zu diesem Zweck wurde ein ganzheitliches Simulationsmodell entwickelt, das eine detaillierte Abbildung von Motor und Getriebe virtuell in ein Fahrzeugmodell einbindet, mit dem verschiedene Fahrzyklen abgefahren werden können. Das Simulationsmodell ermittelt zu jedem Zeitpunkt, wie die eingesetzte Kraftstoffenergie verteilt wird, die neben dem Antrieb des Fahrzeuges zu großen Teilen zur Aufheizung des Gesamtsystems dient.

So erhält der Motor- oder Getriebeentwickler jederzeit eine Aussage über den Energieverbrauch des gesamten Fahrzeugs. Er kann abschätzen, wie sich Einzelmaßnahmen gegenseitig positiv oder negativ beeinflussen. Alle ermittelten Ergebnisse des Clusterprojekts wurden auf Basis dieser Simulationstechniken zu einem „virtuellen Technologieträger“ zusammengeführt, der unter Ausnutzung aller Einzelmaßnahmen eine Reibleistungsminderung von etwa 30 Prozent aufweist.



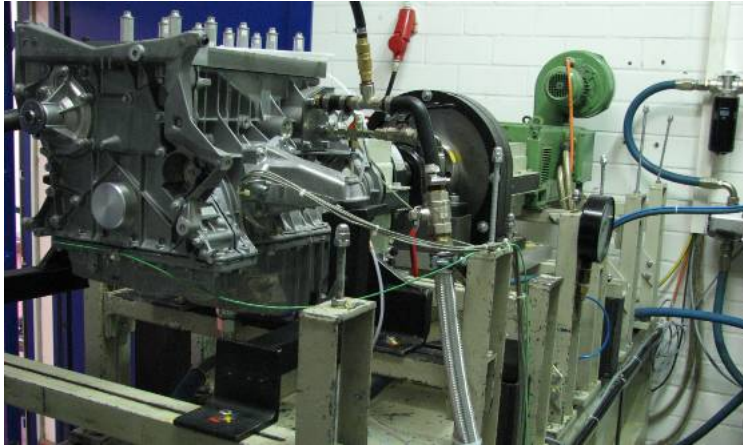
An einem **virtuellen Technologieträger** können die Einzelmaßnahmen jederzeit auf CO₂-Einsparpotenziale überprüft werden.

Neben dem Aufbau des virtuellen Technologieträgers galt es auch, die Fundamente der Reibungsminimierung besser zu verstehen. Ein Schwerpunkt lag auf der grundlegenden Untersuchung niedrig belasteter Gleitkontakte und -lager im Motor sowie hochbelasteter Wälzkontakte des Getriebes. Daneben wurde das Verformungs- und Fließverhalten von Schmierstoffen unter verschiedenen Druck- und Temperatureinflüssen untersucht.

Der Motor: Mehr Effizienz schon an der Quelle

Wie hoch die Reibungsverluste im Motor ausfallen, hängt entscheidend davon ab, wie schnell das Aggregat seine Betriebstemperatur erreicht. Daher befassten sich gleich zwei Teilprojekte mit einer intelligenten und bedarfsgerechten Steuerung der im Motor auftretenden Wärmeströme. Die beteiligten Forscher der RWTH Aachen setzen beispielsweise auf eine radikale Abkehr von bisherigen Konstruktionsprinzipien: Der Kühlkreislauf von Zylinderkopf und Zylinderblock wurden durch ein Ventil voneinander getrennt. Dadurch ist der Motorwarmlauf deutlich zu verkürzen; die Reibungsverluste können sowohl nach einem Kaltstart als auch im Start-Stopp-Betrieb reduziert werden. Eine effizientere und bedarfsgerechte Regelung der Kolbenkühlung durch Spritzöl soll dazu beitragen, die Antriebsleistung der Ölpumpe zu reduzieren.

Gleitlager, die seit mehr als einem Jahrhundert in Motoren erfolgreich eingesetzt werden, können durch innovative Beschichtungen optimiert werden. Hierzu wurden mehrere Varianten der Oberflächengestaltung untersucht. Erweiterte Berechnungen und Daten aus stationären Messungen dienen als Grundlage für ein Gleitlager-Simulationsmodell, dessen Ergebnisse in den „virtuellen Technologieträger“ einfließen. Der Einsatz von Wälzlager für die Kurbelwelle zeigt hier mit Abstand das größte Potenzial, die Reibarbeit zu senken. Akustische Nachteile durch den Einsatz von Wälzlager konnten durch konstruktive Maßnahmen kompensiert werden.



Um den **Einfluss der Gleitlager auf die Gesamtreibung im Motor** nachweisen zu können, wurde eine Vielzahl von Prüfstandsversuchen durchgeführt.

Auch dafür wurden neue Berechnungsverfahren entwickelt und an einem Referenzfahrzeug validiert. Mit einer neuen Simulationsmethodik lassen sich die akustischen und reibungsrelevanten Anforderungen an Wälzlager besser auflösen, die bislang einer Großserieneinführung entgegenstanden.

Wesentlichen Anteil an der gesamten Reibung im Motor hat zudem die Paarung Kolben/Zylinderlaufbahn. Besondere Aufmerksamkeit ist dabei den Kolbenringen zu widmen. Mit neuen Simulationswerkzeugen, die im Rahmen des Clusterprojekts entwickelt wurden, lassen sich die Kolbenringgestaltung, Oberflächenbeschaffenheit und thermische Randbedingungen auf die Kolbenreibung beschreiben. Der Einfluss der lokalen Schmierstoffeigenschaften, Ringvorspannung und -spiel, Honung und des Schmierstoffbedarfs kann so analysiert werden und in Optimierungsmaßnahmen einfließen.

Getriebe: Besserer Wirkungsgrad durch innovative Zahnräder

Über die Effizienz eines Fahrzeugantriebs entscheidet nicht allein der Motor, sondern auch der Wirkungsgrad des Getriebes. Die beiden Systeme sind dabei nicht unabhängig voneinander zu betrachten. Je schneller das Getriebe seine optimale Betriebstemperatur erreicht, desto geringer fallen die Reibungsverluste im Getriebe aus. Eine gezielte Weiterleitung der Motorabwärme an das Getriebe kann sich somit in einem verringerten Kraftstoffverbrauch niederschlagen. Damit ein solches Wärmemanagement bei künftigen Entwicklungen gezielt eingesetzt werden kann, wurde im Rahmen des Forschungsclusters das existierende Berechnungsprogramm „WTplus“ wesentlich weiterentwickelt. Dazu musste das Programm auf instationäre Zustände erweitert werden. Dies gelang durch eine Berücksichtigung des Wärmespeichervermögens und eine höhere Detaillierung des Getriebemodells.

Ein großer Teil der Verluste im Getriebe entsteht durch die ineinandergreifenden Zahnräder. Neue Verzahnungen können die Reibleistung deutlich verringern, ohne dass die Fähigkeit hohe Drehmomente zu übertragen, darunter leidet. Derart optimierte Zahnräder unterscheiden sich vom heutigen Serienstand der Automobilindustrie sichtbar: Die Zähne selbst sind erheblicher kleiner, wobei deren Anzahl steigt und die Breite zunimmt. Durch diese Bauweise wird der Zahneingriff auf einen engen Bereich um den Wälzpunkt konzentriert, die die Gleitreibung nimmt ab. Im Rahmen mehrerer Teilprojekte konnte messtechnisch nachgewiesen werden, dass die in der Theorie vorhergesagten Vorteile der innovativen Verzahnung technisch nutzbar sind.



Durch **innovative Verzahnungen** kann die Gleitreibung im Getriebe deutlich vermindert werden.

Im Rahmen des Forschungsclusters wurden zudem untersucht, inwieweit Getriebeteile durch Oberflächenbehandlung so optimiert werden können, dass weniger Reibung entsteht. So wurden konventionell geschliffene Oberflächen mit sehr glatten, gleitgeschliffenen, laserstrukturierten Oberflächen sowie mit kohlenstoffbasierten Oberflächenbeschichtungen verglichen. Weiteres Potential zur Wirkungsgradsteigerung besteht beim Schmierstoff. Dazu wurden unter anderem reibungsarme synthetische Öle mit niedriger Viskosität untersucht. Mit einer optimalen Maßnahmenkombination konnte eine deutliche Wirkungsgradverbesserung gezeigt werden.

Alle theoretischen und experimentellen Erkenntnisse der Teilprojekte wurden in die Getriebesimulation integriert und fließen damit in den virtuellen Technologieträger ein.

Schon bald in Serie

Im Rahmen des Forschungsclusters sind innovative Entwicklungswerkzeuge entstanden, mit deren Hilfe sich viele der erarbeiteten Einsparpotenziale innerhalb von drei Jahren in industrielle Produkte umsetzen lassen. Die Umsetzung hängt nicht an einer bestimmten Antriebsart. Sowohl Hybridfahrzeuge als auch Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren werden von den Ergebnissen profitieren. Die erzielte Reibleistungsminderung von 30 Prozent trägt wesentlich dazu bei, künftige Fahrzeug-generationen verbrauchsoptimal zu gestalten. Kommende Grenzwerte, etwa der Europäischen Union, für den CO₂-Ausstoß sind so leichter einzuhalten. Damit trägt das Cluster dazu bei, die Wettbewerbsfähigkeit der Schlüsselindustrie Automobilbau über die gesamte Wertschöpfungskette zu steigern.

Interdisziplinäre Schulung

Das Cluster bestand aus 18 Teilprojekten, die an acht Forschungsstellen bearbeitet wurden. Für viele der beteiligten Nachwuchsforscher war das eine Chance, sich frühzeitig in einer interdisziplinären Arbeitsweise zu üben. Denn die Erkenntnis, dass das Ganze mehr als die Summe seiner Teile ist, mag alt sein. Wird sie heute konsequent angewandt, das zeigen die Ergebnisse, so sind erhebliche Verbesserungen bei der Ressourcenproduktivität möglich.

Breite öffentliche und industrielle Unterstützung

Das Verbundvorhaben „Low Friction Powertrain“ wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) gefördert. Neben der erheblichen öffentlichen Förderung in Höhe von 3,1 Mio. Euro steuerten rund 60 Unternehmen der Automobil- und Zulieferindustrie erhebliche Eigenmittel bei. Diese beliefen sich auf 1,4 Mio. Euro, die über das industriefinanzierte CO₂-Sonderforschungsprogramm von FVA und FVV zur Verfügung gestellt wurden. Das Programm wurde von den Forschungsvereinigungen im Jahr 2009 gemeinsam gestartet. Darüber hinaus haben sich Vertreter der Industrieunternehmen über begleitende Arbeitskreise aktiv in alle Teilprojekte eingebracht und so die Praxisrelevanz der bearbeiteten Aufgaben sichergestellt.

Wirtschaftliche Bedeutung und Vernetzung im Clustervorhaben

Ziel des Forschungsclusters war es, in interdisziplinärer Zusammenarbeit die Potenziale systemübergreifender Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz im Antriebsstrang, mit Fokus auf bedarfsgerechte, selektive Reibungsoptimierung an Einzelkomponenten darzustellen und diese insbesondere für kleinere und mittlere Unternehmen (KMU) zugänglich zu machen. Den KMU, die Bauteile und Komponenten für den gesamten Antriebsstrang liefern, wird im Zusammenspiel der Wertschöpfungskette zunehmend abverlangt, technologisch und wirtschaftlich interessante Gesamtlösungen anzubieten. Eine der großen Herausforderungen im Cluster war es daher, die Zusammenarbeit über 18 Teilprojekte so zu gestalten, dass alle Ergebnisse und damit das dringend benötigte Wissen als Voraussetzung für die zukunftssichernde Produktentwicklung in effizient nutzbarer Form zur Verfügung gestellt und hierdurch insbesondere die Position der KMU in der Zulieferkette gestärkt werden kann. Die bewährten Strukturen in den beiden federführenden Forschungsvereinigungen waren hierfür hilfreich, wurden aber aufgrund der Komplexität des Clusters und der notwendig engen Vernetzung der Teilprojekte durch weitere Maßnahmen unterstützt (Einrichtung von Lenkungsgruppen, Nutzung Onlinedatenbank zum Abruf der Teil- und Endergebnisse, etc.). Erläuternd hierzu sind Clusterstruktur und Projektvernetzung in den Anlagen dargestellt.

Die IGF-Vorhaben des Clusters mit IGF-Nrn.: 15785, 15786, 15787, 15788, 15789, 15790, 15791, 15792, 15793, 15794, 15795, 15796, 15797 und 15798 der Forschungsvereinigungen Antriebstechnik e. V. (FVA) und Verbrennungskraftmaschinen e. V. (FVV) wurden über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kontakt: Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV)
Dirk Bösel
Tel.: 069 6603 1682 / Email: boesel@fvv-net.de

Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA)
Dirk Arnold
Tel.: 069 6603 1632 / Email: dirk.arnold@vdma.org

Zur Forschungsvereinigung für Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV):

Die FVV wurde 1956 gegründet und hat sich zum weltweit einmaligen Netzwerk der Motoren- und Turbomaschinenforschung entwickelt. Sie treibt die gemeinsame, vorwettbewerbliche Forschung in der Branche voran und bringt Industrieexperten und Wissenschaftler an einen Tisch, um die Wirkungsgrade und Emissionswerte von Motoren und Turbinen kontinuierlich zu verbessern – zum Vorteil von Wirtschaft, Umwelt und Gesellschaft. Außerdem fördert sie den wissenschaftlichen Nachwuchs. Mitglieder sind kleine, mittlere und große Unternehmen der Branche: Automobilunternehmen, Motoren- und Turbinenhersteller sowie deren Zulieferer.

Zur Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA):

Die FVA ist ein gemeinnütziger eingetragener Verein zum Zweck der Gemeinschaftsforschung und Ausbildung im Bereich der Antriebstechnik. Eingebunden in die Organisationsstruktur des Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA) stellt die FVA das weltweit führende Netzwerk der Antriebstechnik dar. Mitglieder sind produzierende Unternehmen aus der Branche Antriebstechnik. Zum Netzwerk der FVA gehören die besten Forschungsinstitute, die sich mit Antriebstechnik beschäftigen.

IGF-Nr.	FVV / FVA-Nr.	Teilcluster (TC)	LFP-Nr.	Thema des Antrages
15785	585	TC1 Grundlagen und Auslegung	A1.1	Reibungsminderung in geschmierten Kontakten
15786	583		A1.2	Thermophysikalische Eigenschaften (Schmierstoffe)
---	980		A2.1	Simulation Verluste Gesamtantriebsstrang
15787	970		A3.1	EHD Wälz- / Gleitkontakt
15788	971		A3.2	Tribologische Charakterisierung rauher Oberflächen
15789	582	TC2 Getriebe	G1.1	Tragfähigkeit Low-Loss Verzahnung
---	981		G2.1	Wirkungsgradoptimiertes Getriebe
15790	584		G3.1	Instationäre Getriebetemperatur
15791	972	TC3 Kolben / Liner	M1.1	Kühlsystemmanagement
15792	973		M1.2	Bedarfsgerechte Kolbenkühlung
15793	974		M2.1	Kolbengruppe / Reibungsreduzierende Oberflächen
---	982		M2.2	Reibungsverluste Kolben / Kolbenring / Liner
15794	975	TC4 Lager-auslegung	M3.1	Gleitlagerung im Kurbeltrieb / Reibungsreduzierte Oberflächen
15795	976		M3.2	Wälzlagerung im Kurbeltrieb
---	983		M3.3	Energetisch optimierte Ölversorgung von Kurbelwellen-Gleitlagern
15796	977		M3.4	Drehzahlhochlauf Gleitlager
15797	978		M3.5	Gleitlager im Kurbeltrieb
15798	979		M3.6	Grundlagen reibungsarmer Wälzlager

Low Friction Powertrain - Teilprojekt A1.1
Vorhaben Nr.: 585

Reibungsminimierung in geschmierten Kontakten

Thema: Grundlagen zur Reibungsminimierung in geschmierten Kontakten

Da im Antriebsstrang eine Vielzahl von Reibkontakten den Wirkungsgrad des gesamten Antriebs reduziert, ist gerade dort ein großes Potenzial zur Verbesserung des Gesamtwirkungsgrads vorhanden. Die Optimierung dieser Reibkontakte kann dabei zum einen an den Bauteilen selber, zum anderen aber auch an den eingesetzten Schmierstoffen erfolgen. Das Ziel des Vorhabens bestand in der grundlegenden Analyse des Einflusses unterschiedlicher Oberflächen und unterschiedlicher Schmierstoffe auf das Verhalten in geschmierten Kontakten. Hierzu wurden verschiedene Beschichtungen und Schmierstoffe in grundlegenden Pin-on-Disk-Tribometer (PoD)- (getriebeseitig) und Schwingverschleiß-Tribometer (SVT)- (motorseitig) Untersuchungen sowie in anwendungsnahen Untersuchungen im Zweischeiben-Prüfstand analysiert. In den grundlegenden Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Schmierstoffauswahl einen sehr großen Einfluss auf das Verhalten eines beschichteten tribologischen Kontakts hat. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass es mit Beschichtungen möglich ist, die Reibverluste auch bei vollständiger Trennung der Festkörper (Vollschmierung) zu senken. Diese Erkenntnisse wurden dazu genutzt, um auch Motor- und Getriebebauteile für andere Teilprojekte zu beschichten. So konnten beschichtete Lagerschalen im Teilprojekt M3.1 (IGF-Nr. 15794) und beschichtete Getriebebauteile sowie ausgewählte Oberflächenvarianten und Schmierstoffe für Zahnräder im Teilprojekt G2.1 (FVV Nr. 609811) eine Verbesserung des Wirkungsgrads von bis zu 30 % in Praxistests belegen. Somit kann festgehalten werden, dass es durch die Durchführung der grundlegenden Arbeiten in diesem Teilprojekt gelungen ist, wichtige Erkenntnisse zu generieren, um das Gesamtziel des Forschungsclusters „Low Friction Powertrain“ zu erreichen.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Das IGF-Vorhaben 15785 N der Forschungsvereinigung Antriebstechnik wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Low Friction Powertrain - Teilprojekt A1.2
Vorhaben Nr.: 583

Thermophysikalische Eigenschaften von Öl

Thema: Bestimmung und Modellierung der thermophysikalischen Eigenschaften von Schmier- und Kraftstoffen unter hohen Drücken

Überblick:

Die Steigerung der Energieeffizienz im Fahrzeugantriebsstrang und die damit einhergehende selektive Reibungsoptimierung an den Einzelkomponenten führt zu ständig steigenden Anforderungen an die tribologischen Eigenschaften der Schmierstoffe. Die Notwendigkeit einer Minimierung der Reibungsverluste einerseits und die hohe Belastung elasto-hydrodynamischer Kontakte bei erhöhten Öltemperaturen andererseits macht eine sorgfältige Optimierung aller Kontaktpartner innerhalb eines Tribosystems erforderlich.

Die Reibstellen im Motor und im Getriebe gehören zu den hoch- und höchstbelasteten tribologischen Kontakten im Motoren und Maschinenbau. Ihre sichere Funktion hängt im Wesentlichen von den thermophysikalischen Eigenschaften des verwendeten Schmierstoffes ab. Bei gleichzeitig steigender Leistungsdichte werden immer höhere Anforderungen an die Betriebssicherheit des Antriebsstranges bei Betriebsstörungen oder sonstigen unvorhersehbaren Betriebsstörungen gestellt. Dies erfordert zudem eine kontinuierliche Erweiterung der zum Einsatz kommenden Berechnungs- und Simulationsverfahren. Die heute eingesetzten Simulationsprogramme verwenden zur Beschreibung des Schmierstoffes zumeist einfache Gleichungen, die die physikalischen Vorgänge im realen System abstrahieren und nur beschränkt genau nachbilden. Darüber hinaus fehlen wichtige rheologische Zusammenhänge in Bezug auf die Interaktion zwischen den Bauteilen und dem kontaktierenden Schmierstoff. Daher wurden wie angestrebt thermophysikalische Schmierstoffkennfelder experimentell erfasst und ganzheitlich unter für praxisnahe Betriebsbedingungen modelliert

Untersucht wurden die im Cluster zur Reibungsminimierung eingesetzten Motoren- und Getriebeöle. Die Ergebnisse wurden anderen Teilprojekten zur Auswertung der Prüfstandsversuche und als Kenngrößen zur Beschreibung des Maschinenelements „Schmieröl“ in Simulationsrechnungen zur Verfügung gestellt.

Auf Basis der Messergebnisse konnten Einflüsse der molekularen Struktur der Schmierstoffe auf ihre rheologischen Eigenschaften insbesondere bei hohen Drücken und Scherbeanspruchungen aufgezeigt werden. Das verbesserte Verständnis molekularer Einflüsse auf das rheologische Verhalten kann von Schmierstoffherstellern zur Entwicklung tribologisch optimierter Schmierstoffe genutzt werden, die die Reibungsverluste im Antriebsstrang noch weiter minimieren.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Das IGF-Vorhaben 15786 N der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Low Friction Powertrain – Teilprojekt A2.1

Vorhaben Nr. 980

Simulation Verluste Gesamtantriebsstrang

Abschlussbericht

Kurzfassung:

Das Ziel des Forschungsclusters *Low Friction Powertrain* ist die Reduzierung der Reibungsverluste in einem Fahrzeugantriebsstrang um 30 %. Zur Zielerreichung dienen sowohl Maßnahmen zur Reduzierung der Komponentenverluste in Verbrennungsmotor und Getriebe als auch die Optimierung des Gesamtsystems Antriebsstrang.

Das Clusterprojekt gliedert sich in je einen Motor- und Getriebeteil sowie in einen übergreifenden Grundlagenteil. In den verschiedenen Teilprojekten werden Maßnahmen zur Verlustreduzierung einzelner Komponenten und Teilsysteme entwickelt und teilweise auch experimentell mittels Prüfstandversuchen abgesichert. Die erarbeiteten Einzelmaßnahmen fließen im Rahmen des Teilprojekts A2.1 *Simulation Verluste Gesamtantriebsstrang* in einen virtuellen Technologieträger ein. Dieser umfasst ein detailliertes Motor- und Antriebsstrangmodell des Referenzfahrzeugs. Mit Hilfe des Simulationsmodells können Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemission für vorgegebene Fahrprofile ermittelt werden. Die detaillierte Modellierung der einzelnen Komponenten ermöglicht eine hoch aufgelöste Darstellung der Energieflüsse im Antriebsstrang. Dadurch kann die Wirkung der einzelnen Optimierungsmaßnahmen aus den Teilprojekten komponentenbezogen durch Simulationsrechnungen quantitativ bewertet werden.

Neben der Bewertung der Ergebnisse aller Teilprojekte des Forschungsclusters im Gesamtsystem, sind Thermomanagementmaßnahmen durch Eingriffe ins Kühl- und Schmiersystem des Motors durchgeführt und die Auswirkungen im NEFZ quantifiziert. Für das Getriebe werden folgende Optimierungsmaßnahmen untersucht: verlustoptimierte Verzahnungsgeometrie, Gleitschleifen, Variation des Grundöltyps und der Schmierstoffviskosität, Reduzierung des Ölstand, beschichtete Zahnflankenoberflächen und Thermomanagement.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Berichtsumfang:	119 S., 95 Abb., 9 Tab., 83 Lit.
Beginn der Arbeiten:	01.10.2008
Ende der Arbeiten:	30.09.2012
Zuschussgeber:	Das Vorhaben wurde im Rahmen des CO2-Sonderforschungsprogramm der Forschungsvereinigungen Antriebstechnik (FVA) und Verbrennungskraftmaschinen (FVV) durch Industriemittel finanziert

Low Friction Powertrain - Teilprojekt A3.1

Vorhaben Nr. 970

EHD Wälz-/Gleitkontakte - Tribologische Kennwertbildung rauer Oberflächen für Gleit- und Wälzkontakte

Abschlussbericht

Kurzfassung:

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Programmweiterungen zur elasto-hydrodynamischen Spaltweitenberechnung unter Berücksichtigung real vermessener, rauer Oberflächen-feinstrukturen umgesetzt, die es ermöglichen, den Einfluss auf die Druck- und Spaltweitenentwicklung im EHD-Kontakt zu betrachten. Die Umsetzungen konnten mit Hilfe einer Vielzahl von Spaltweitenmessungen an einem 2-Scheiben-Tribometer überprüft werden und lieferten sehr gute Übereinstimmungen. Zudem wurde ein Modell zur Berechnung der Temperaturentwicklung im Schmierfilm umgesetzt und anhand einer internationalen Arbeit ebenfalls verifiziert. Ein Beurteilungskriterium in Bezug auf das hydrodynamische Reibverhalten konnte ebenso numerisch implementiert werden.

Um die globale und lokale Elastizität der Makro- bzw. Mikrostruktur in MKS-Programmsysteme einbinden zu können, wurden auf Grundlage von Parametervariation Dämpfungs- und Steifigkeitskennzahlen für verschiedene, zur Verfügung gestellte Oberflächenstrukturen erstellt, die dann in die praxisnahe Simulation eines Nocken-Gegenläufer-Kontaktes eingebunden werden konnte. Somit ist es fortan möglich, sogar lokale, Mikrostruktur bezogene Materialelastizitäten in MKS-Bauteilsimulationen einzubinden und in einem nachgeschalteten Postprocessing Untersuchungen bzgl. der Belastungskollektive zu tätigen.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Berichtsumfang:	66 S., 63 Abb., 5 Tab., 54 Lit.
Beginn der Arbeiten:	01.10.2008
Ende der Arbeiten:	30.09.2012
Zuschussgeber:	BMW i / IGF-Nr. 15787 N/1

Low Friction Powertrain – Teilprojekt A3.2

Vorhaben Nr. 971

Tribologische Charakterisierung rauher Oberflächen

Abschlussbericht

Kurzfassung:

Die übergeordneten Entwicklungsziele technischer Antriebssysteme werden derzeit zunehmend durch ökologische Kriterien bestimmt und durch technische Maßnahmen umgesetzt, die zur Reduktion von Primärenergieeinsatz und CO₂-Emissionen beitragen. Dies betrifft Motoren- und Antriebselemente gleichermaßen. Die steigenden Ansprüche an thermomechanisch hoch belasteten Oberflächen können aber allein durch den Einsatz geeigneter Materialien und Schmierstoffe nicht immer zufriedenstellend erfüllt werden. Hier bieten, durch Verbesserung der mikrohydrodynamischen Struktureigenschaften, funktionsoptimierte Mikrostrukturen von Oberflächen hochbelasteter Gleitpaarungen ein breites Potenzial, Reibung und Verschleiß zu reduzieren. Im Rahmen des Teilprojektes A3.2 wurden optimierte Oberflächenstrukturen, die eine Verbesserung der mikrohydrodynamischen Eigenschaften mit sich bringen, ermittelt. Im Laufe des Projektes wurden insgesamt drei Anwendungsfälle aus dem Bereich der Motoren- und Getriebetechnik betrachtet: Zahnräder, Zylinderbuchsen und Gleitlager. In Zusammenarbeit mit den Projekten M2.2 und M3.5 ergaben sich im NEFZ für den Anwendungsfall Zylinderbuchse durch Honwinkelvariation die Reibungsvorteile bis ca. 5% und für den Anwendungsfall Gleitlager durch die Napfstrukturen die Reibungsvorteile für Hauptlager bis ca. 3.5% und für Pleuellager bis ca. 12%.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Berichtsumfang:	38 S., 41 Abb., 0 Tab., 29 Lit.
Beginn der Arbeiten:	01.10.2008
Ende der Arbeiten:	30.09.2012
Zuschussgeber:	BMW i über AiF, IGF-Nr. 15788

Low Friction Powertrain - Teilprojekt G1.1
Vorhaben Nr.: 582

Tragfähigkeit Low-Loss Verzahnung

Thema: Bestimmung der Tragfähigkeit von verlustoptimierten Verzahnungen und Untersuchungen zum Wirkungsgrad und zum Geräuschverhalten von diesen Verzahnungen

Überblick:

Verluste in Verzahnungen können durch eine gezielte Auslegung der Verzahnungsgeometrie verringert werden. Derartige *LowLoss-Verzahnungen* weisen einen großen Eingriffswinkel ($\alpha_n \gg 20^\circ$), eine kleine Profilüberdeckung ($\varepsilon_\alpha \leq 1,0$) und einen möglichst kleinen Modul auf und liegen daher außerhalb des Gültigkeitsbereichs der Normen und Berechnungsverfahren zur Tragfähigkeit. In diesem Vorhaben wird in einem umfangreichen Versuchsprogramm die Zahnfuß- und die Zahnflankentragfähigkeit (Grübchen, Grauflecken, Fressen, Verschleiß) von *Low-Loss-Verzahnungen* empirisch ermittelt. Die Versuchsergebnisse fließen direkt in einen Vorschlag zur Erweiterung der Normen und Berechnungsverfahren ein. Zur *DIN 3990 T3 (ISO 6336-3)*, in der die Zahnfußtragfähigkeit geregelt ist, wird ein neuer Modifikationsvorschlag vorgestellt, der die Berechnung einfacher, verständlicher und genauer macht und mit dem auch *LowLoss-Verzahnungen* berücksichtigt werden können. Anhand von Wirkungsgradmessungen an den Versuchsverzahnungen wird die Gültigkeit der in der Praxis verwendeten Gleichungen zur Berechnung des Wirkungsgrads überprüft. Zudem wird das Anregungsverhalten der Versuchsverzahnungen untersucht. Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Summary:

Power losses in gears can be reduced by specific gear design. Such *LowLoss-Gears* are designed with a large pressure angle ($\alpha_n \gg 20^\circ$), a small transverse contact ratio ($\varepsilon_\alpha \leq 1,0$) and a preferably small module m . Hence they are out of the area of validity of the calculation of the load carrying capacity in standards. This project identifies empirically the tooth breakage and tooth flank load capacity (pitting, micropitting, scuffing, wear) of *LowLoss-Gears* by an extensive test scheme. The results are integrated directly in a recommendation expanding the standards. A new proposal modifying the *DIN 3990 T3 (ISO 6336-3)* for tooth breakage load carrying capacity is presented. The modification makes the calculation of gears simpler, more coherent and more exact and includes *LowLoss-Gears*. The validity of the formulas used in industry to calculate the power losses in gears is proved via efficiency measurements with the test gears. Finally the vibration excitation in the test gears is measured.

Gefördert durch:

Das IGF-Vorhaben 15789 N der Forschungsvereinigung Antriebstechnik wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Low Friction Powertrain - G2.1

Vorhaben Nr. 981

Wirkungsgradoptimiertes Getriebe

Abschlussbericht

Im Rahmen des Forschungsprojektes „G2.1 Wirkungsgradoptimierendes Getriebe“ wurden Weiterentwicklungen von energieeffizienten, reibungsminimierten Getrieben erzielt, wobei Maßnahmen in Bezug auf Zahnradgeometrie, Oberflächenstrukturierung, Oberflächenbeschichtung, Wälzlagerungen bzw. Dichtungstechnik durch experimentelle und simulatorische Untersuchungen diskutiert und bewertet wurden.

Sämtliche Arbeit dieses Forschungsprojektes wurde hinsichtlich der Themenbereiche in zwei Forschungsstellen, Forschungsstelle 1, FVV-Nr. 609811 und Forschungsstelle 2, FVV-Nr. 609812, verteilt. Während der Schwerpunkt der Forschungsstelle 1 im Bereich Zahnradgeometrie, Oberflächenstrukturierung bzw. Oberflächenbeschichtung liegt, beschäftigte sich Forschungsstelle 2 mit dem Thema Wälzlagerung und Dichtungstechnik.

Der Abschlussbericht für das gesamte Forschungsprojekt „G2.1 Wirkungsgradoptimierendes Getriebe“ besteht entsprechend dieser Themenzuordnung aus zwei Unterberichten, die beruhend auf die jeweilig durchgeführte Arbeit von den beiden Forschungsstellen erstellt wurden.

Der vorliegende Bericht ist der Abschlussbericht von der Forschungsstelle 2.

Kurzfassung:

Die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Lagerreibung sind die mechanische Beanspruchung, die Umgebungsbedingungen und die Zusammensetzung des Schmierstoffes. Der Bewegungswiderstand in einem Wälzlager setzt sich aus unterschiedlichen Anteilen zusammen. Diese Reibanteile zusammen mit ihrer Einflussfaktoren eines axial belasteten Rillen bzw. Schrägkugellager wurde im Rahmen von FVA-Forschungsvorhaben Nr. 388 und 388II sowohl theoretisch als auch experimentell untersucht. Basierend auf den gewonnenen Kenntnissen wurde ein Berechnungsmodell entwickelt.

Als Erweiterung dieses Berechnungsmodells für axialbelastete Rillen- bzw. Schrägkugellager bei Fettschmierung stehen Wälzlager mit Linienkontakt im Mittelpunkt. Dabei handelt sich um radial belastete Zylinderrollenlager und axial belastete Kegelrollenlager. In Anlehnung an das Ausgangsberechnungsmodell wird das gesamte Reibmoment eines Zylinder- / Kegelrollenlagers ebenfalls in mehrere Reibanteile geteilt, die getrennt mit passenden analytischen Ansätzen berechnet werden können. Als Voraussetzung für die Berechnung der lastabhängigen Reibanteile wird ein Berechnungsmodell entwickelt, das die Lastverteilung des Lagers je nach betrachteten Anwendungen bei radialer bzw. kombinierter Belastung ermittelt. Neben der Fettschmierung wird die Ölschmierung in Betrachtung gezogen, indem der Planschverlust bei einer Ölbad schmierung analytisch berechnet werden kann. Wenn Rillenkugellager unter radialer Belastung sind, besonders bei erhöhter Belastung, wird die Reibung infolge des Differentialschlupfes zwischen den Wälzkörpern den Laufbahnen berücksichtigt. Darüber hinaus wird der Berechnungsansatz für das Reibmoment am Radialwellendichtring im Berechnungsmodell implementiert. Durch den Vergleich mit Ergebnissen von experimentellen Untersuchungen wird das erweiterte Berechnungsmodell verifiziert. Die gewonnenen Berechnungsgrundlagen werden für die Integration in das FVA-EDV-Programm WTplus bereitgestellt.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Low Friction Powertrain - Teilprojekt G2.1

Vorhaben Nr. 981, Forschungsstelle 1

Wirkungsgradoptimiertes Getriebe

Abschlussbericht

Kurzfassung:

Ziel des gesamten Forschungsclusters „Low Friction Powertrain“ ist die Reduktion der Verluste innerhalb des Antriebsstranges um 30%. Eine Reduktion des Verbrauches kann zum einen durch die Minimierung der lastabhängigen Verluste innerhalb des Antriebsstranges erfolgen, das heißt vor allem durch die Minimierung der Verluste in den Reibkontaktstellen der Verzahnungen und Lagerungen. Zum anderen lassen sich die lastunabhängigen Plansch- und Quetschverluste vor allem durch eine optimierte Ölversorgung reduzieren.

Innerhalb des vorliegenden Forschungsvorhabens „G2.1 Wirkungsgradoptimiertes Getriebe“ werden dazu als Hauptziel die Ergebnisse vorhergehender Teilprojekte innerhalb einer verlustoptimierten Stirnradstufe experimentell zusammengefasst.

Die vergleichsweise größten Einsparungen, sowohl absolut als auch relativ gesehen, ergeben sich durch eine verlustoptimierte Auslegung der Verzahnungsgeometrie. Den zweithöchsten Effekt erzielt der Einsatz des reibungsarmen Schmierstoffes PE10. Vor allem bei kleinen Umfangsgeschwindigkeiten ergeben sich durch eine glattere Oberflächenstruktur nochmals deutliche Einsparungen. Bei großen Umfangsgeschwindigkeiten hingegen bewirken die Absenkung von Ölstand und -viskosität eine weitere Reduktion der Getriebeverluste. Das gilt nicht nur für die lastabhängigen, sondern auch für die lastunabhängigen Anteile.

Im Durchschnitt über alle untersuchten Betriebsbedingungen lassen sich durch die Kombination aller Optimierungsmaßnahmen insgesamt 85% der lastabhängigen Verzahnungsverluste im Getriebe einsparen. Zusätzlich dazu lassen sich über die Absenkung des Ölstandes durchschnittlich 13% der lastunabhängigen Getriebeverluste einsparen.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Berichtsumfang:	122 S., 104 Abb., 11 Tab., 45 Lit.
Beginn der Arbeiten:	01.10.2008
Ende der Arbeiten:	30.09.2012
Zuschussgeber:	Das Vorhaben wurde im Rahmen des CO ₂ -Sonderforschungsprogramm der Forschungsvereinigungen Antriebstechnik (FVA) und Verbrennungskraftmaschinen (FVV) durch Industriemittel finanziert.

Low Friction Powertrain - Teilprojekt G3.1
Vorhaben Nr.: 584

Instationäre Getriebetemperatur

Thema: Berechnung der Getriebetemperatur für instationäre Zustände

Überblick:

Neben Last und Drehzahl wird die Verlustleistung eines Getriebes wesentlich von der Schmierstoffviskosität und somit von der Schmierstofftemperatur beeinflusst. Die Betriebstemperatur kann infolge ändernder Umgebungs- und Betriebsbedingungen jedoch stark schwanken, was sich direkt auf die entstehenden Getriebeverluste auswirkt.

Zur rechnerischen Bestimmung von Wirkungsgrad und Betriebstemperatur eines Getriebes sind Berechnungsmodelle für Verlustleistung und Wärmeabfuhr notwendig. Im vorliegenden Forschungsvorhaben werden bestehende Modelle zur Verlust- und Wärmeabfuhrberechnung erweitert und miteinander gekoppelt, um simulativ instationäre Wirkungsgrad- und Temperaturverläufe zu bestimmen.

Zur Gewährleistung der thermischen Tragfähigkeit sind unzulässig hohe Temperaturen im Inneren des Getriebes zu vermeiden. Um die Bauteiltemperaturen der einzelnen Getriebekomponenten rechnerisch zu bestimmen, wird die Thermalnetzwerkmethodik angewendet. Das Getriebe wird in isotherme Knotenpunkte aufgeteilt, welche zu einem thermischen Netzwerk verknüpft werden. Abhängig von Geometrie und Struktur des Getriebes sowie Schmier- und Betriebsbedingungen werden die Wärmeleitwerte zwischen den Knotenpunkten ermittelt. Diese sind zur Bestimmung der Wärmeströme zwischen den einzelnen Knotenpunkten notwendig. Aus dem vorliegenden thermischen Netzwerk wird ein Gleichungssystem abgeleitet und nach den gesuchten Komponententemperaturen aufgelöst.

Zur Verifizierung der Berechnungsmodelle werden experimentelle Untersuchungen am FZG-Zahnradverspannungsprüfstand durchgeführt. Dabei werden neben der auftretenden Verlustleistung auch Massentemperaturen von Wälzlagern und Zahnrädern gemessen. Beim Abgleich der Berechnungsergebnisse mit den gemessenen Temperaturen ergibt sich eine gute Übereinstimmung.

Nach erfolgreicher Verifizierung der Berechnungsmodelle wird ein bestehendes EDV-Programm um die instationäre Verlust- und Temperaturberechnung sowie um die Bestimmung der inneren Temperaturverteilung erweitert. Im Falle der instationären Berechnung können zeitabhängige Belastungsprofile vorgegeben werden. Die zur Berechnung der Temperaturänderung nötige Wärmekapazität wird für alle Bauteile aus den eingegebenen Geometrieangaben bestimmt.

Im Falle der Berechnungsoption zur inneren Temperaturverteilung wird die vorgegebene Getriebestruktur automatisch in Knotenpunkte aufgeteilt und diese zu einem thermischen Netzwerk verknüpft. Anschließend werden die Wärmeleitwerte programmintern berechnet und das Gleichungssystem nach den gesuchten Knotentemperaturen aufgelöst.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Das IGF-Vorhaben Nr. 15790 N/1 Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie auf Grund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Low Friction Powertrain – Teilprojekt M1.1

Vorhaben Nr. 972

Kühlsystemmanagement

Abschlussbericht

Kurzfassung:

Während des Betriebes von Verbrennungsmotoren in Pkws müssen diese neben den Fahrwiderständen naturgemäß die Reibung des Antriebsstranges überwinden. In vom Gesetzgeber verlangten relevanten Fahrzeughomologationszyklen und zu allermeist im normalen Fahrbetrieb haben die Motoren bei Motorstart Umgebungstemperatur und durchfahren einen Motorwarmlauf. Ein großer Teil der motorischen Reibung ist dem vergleichsweise kalten System zuzuschreiben. Eingriffe die der Verbesserung des Motorwarmlaufs zur schnellen Absenkung der Reibung im Rahmen von motorischem Thermomanagement dienen, können durch detaillierte Simulationsmodelle quantifiziert werden.

Die aus Sicht des motorischen Verbrennungsprozesses als Verluste zu wertende Wandwärmeströme sind die hauptsächliche Wärmequelle für Thermomanagementsimulationsmodelle. Eine Beschreibung dieser Wandwärmeströme ist für einen Kompressor aufgeladenen 4 Zylinder Ottomotor mit Hilfe einer Prozessrechnung mittels der Software GT Suite V7.1 für das gesamte Motorenkennfeld gewonnen. Dabei sind die Wärmeströme in Kolben, Zylinderlaufbuchse, Flammdeck und Auslasskanal des Motors aufgeschlüsselt. Das Simulationsmodell ist mit hochaufgelösten Messdaten unter Verwendung von Spezialmesstechnik hinsichtlich des Verbrennungsprozesses und vor allem hinsichtlich der Wandwärmeströme über eine genaue Energiebilanz und eine Vielzahl an Materialtemperaturmess-Stellen validiert.

Als Ergebnisse ist neben der Aufteilung der Wandwärmeströme ein Randbedingungspaket für alle relevanten brennraumnahen thermischen Interaktionen zu nennen. Außerdem ist der Einfluss einer Motorbetriebsumstellung während eines Katalysatorheizens auf die Wandwärmeströme untersucht. Der Einfluss fällt mit einer Absenkung der Wandwärmeströme für Kolben und Flammdeck gegenläufig zu einer Erhöhung in Laufbuchse und Auslasskanal aus.

Die Ergebnisse vorliegender Untersuchungen finden in einem Thermomanagement-Simulationsmodell eines gesamten Pkw Antriebsstranges Verwendung, das im Teilvorhaben LFP – A2.1 „Simulation Verluste Gesamtantriebsstrang“ (FVV 980) im Detail beschrieben ist.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Berichtsumfang:	66 S., 50 Abb., 7 Tab., 65 Lit.
Beginn der Arbeiten:	01.10.2008
Ende der Arbeiten:	30.09.2012
Zuschussgeber:	BMW über AiF; IGF-Nr. 15791 N

Low Friction Powertrain – Teilprojekt M1.2

Vorhaben Nr. 973

M 1.2 Bedarfsgerechte Kolbenkühlung

Abschlussbericht

Kurzfassung:

Die spezifische Leistung moderner Otto- und Dieselmotoren steigt stetig. Daraus resultieren steigende thermische und mechanische Belastungen der Bauteile im Motor wie beispielsweise des Kolbens. Eine Absenkung der Bauteiltemperatur des Kolbens kann nur durch eine Wärmeabfuhr über die Kolbenringe und das Schmiermittel erfolgen. In hochbelasteten Motoren kommt zusätzlich die Ölspritzkühlung zum Einsatz.

Ziel dieses Teilprojektes ist es, eine regelbare Kolbenkühlung sowohl in das Wärmemanagement des Motors zu integrieren, um eine an den Bedarf angepasste Kühlung der Kolben zu ermöglichen, als auch die Art der Kühlung durch eine Effektivitätssteigerung des Wärmeübergangs zu verbessern. Die Realisierung kann nur im Zusammenhang mit der Motorsteuerung erfolgen, so dass eine an den Bedarf angepasste Ölzufuhr erfolgt, um damit die Antriebsleistung der Ölpumpe zu reduzieren. Die Effektivitätssteigerung des Wärmeübergangs erfordert ein detailliertes Grundlagenwissen über die Mechanismen der Wärmeübertragung.

Zu diesem Zweck wurden am WSA experimentelle Grundlagenuntersuchungen durchgeführt, die diese Mechanismen der Wärmeübertragung vom Kolben an das zur Kühlung eingesetzte Spritzöl untersuchen. Die Ergebnisse werden durch eine Nusselt-Korrelation abgebildet, die den Wärmeübergang für die im Motor vorliegenden Kennzahlbereiche beschreibt. Am VKA wurden am gefeuerten Vollmotor Versuche durchgeführt, um die Gültigkeit des Übertrags der Ergebnisse auf den Realmotor zu validieren. Außerdem sollte der Kühlungsbedarf der Kolben im gesamten Betriebskennfeld des Motors ermittelt und Regelstrategien entwickelt werden. Ziel war die Realisierung einer an den Bedarf angepasste Kolbenkühlung, die eine Verringerung der erforderlichen Kühlmengen bewirkt. Hierdurch kann die Ölpumpenleistung vermindert und dadurch der Kraftstoffverbrauch reduziert werden. Es ergibt sich im Gesamtsimulationsmodell aus Teilprojekt A2.1 je nach Kombination mit anderen reibungsreduzierenden Maßnahmen für eine bedarfsgerechte Kolbenkühlung in Kombination mit einer variablen Ölpumpe im NEFZ ein kumulierter Reibungsvorteil von bis zu ca. 2,7 %, was einem kumulierten Kraftstoffverbrauchsvorteil von ca. 0,8 % entspricht

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Berichtsumfang:	60 Seiten, 80 Abb., 2 Tab., 15 Lit.
Beginn der Arbeiten:	01.10.2008
Ende der Arbeiten:	30.09.2012
Zuschussgeber:	BMW über AiF; IGF-Nr. 15792 N

Low Friction Powertrain - Teilprojekt M2.1

Vorhaben Nr. 974

Reibminderung Kolbengruppe

Abschlussbericht

Kurzfassung:

Betrachtet man die mechanischen Verluste moderner Verbrennungsmotoren bei niedriger Last, so fällt der hohe Anteil der Triebwerksreibung, bestehend aus Kolbengruppe, Pleuel und Kurbelwelle, auf. Die Triebwerksreibung hat bei geschlepptem Betrieb einen Anteil von bis zu 60 % an der Gesamtmotorreibung, wovon alleine 30 % auf die Kolbengruppe zurück zu führen sind. Im Gegensatz zu den Motorkomponenten Kurbelwelle und Pleuel unterliegt die Kolbengruppe einem ausgeprägten Lasteinfluss. So kann der Anteil der Kolbengruppe an der Gesamtmotorreibung bei geringeren Drehzahlen und hohen Lasten auf über 50 % ansteigen. Vor dem Hintergrund stetig steigender spezifischer Leistungen und Zylinderspitzendrücken bietet die Kolbengruppe somit ein beachtliches Reibungsreduzierungspotenzial. Betrachtet man die verschiedenen Lineroberflächen so bietet sich eine Fülle an unterschiedlichen Konzepten. Das Spektrum reicht von Variationen des Honverfahrens sowie des Honwinkels, über verschiedene Beschichtungen bis hin zur Realisierung gezielter Ölrückhaltevolumina durch Laserhonen. Alle Konzepte eint das gemeinsame Ziel, möglichst gute tribologische Eigenschaften der Kolbengruppe bei gleichzeitig geringem Ölverbrauch zu gewährleisten. Zur Beurteilung der tribologischen Eigenschaften der Kolbengruppe ist es notwendig, die dynamischen Verläufe der Kolbenreibkraft über das jeweilige Lastkollektiv eines Motors zu kennen. Nur so ist eine Aussage zum Reibungszustand der Kolbengruppe während eines Arbeitsspiels und ebenfalls zu verschleißfördernder Mischreibung möglich. Auch eine Beurteilung der Reibleistung der Kolbengruppe setzt den dynamischen Kolbenreibkraftverlauf in Kombination mit den geometrischen Randbedingungen eines Motors voraus. Forschungsziel des Teilprojektes ist die Entwicklung von reibungsvermindernden Oberflächenstrukturen und Beschichtungen und deren messtechnischen Validierung in Bezug auf die tribologischen Anforderungen der Kolbengruppe. Durch die Rotaplasma-Beschichtung konnte die Reibung bei 1000 1/min und Vollast im Vergleich zur Basishonung um 21 % reduziert werden.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Berichtsumfang:	55 S., 43 Abb., 7 Tab., 29 Lit.
Beginn der Arbeiten:	01.10.2008
Ende der Arbeiten:	30.09.2012
Zuschussgeber:	BMW über AiF; IGF-Nr.15793 N

Low Friction Powertrain – Teilprojekt M2.2

Vorhaben Nr. 982

Reibungsverluste Kolben / Kolbenring / Liner

Abschlussbericht

Kurzfassung:

Im Rahmen des Teilprojektes M2.2 ist das Reibungsreduktionspotential unterschiedlicher Optimierungsmaßnahmen im Bereich Kolbengruppe/Zylinderlaufbahn untersucht worden. Die Maßnahmen basieren im Wesentlichen auf den Ergebnissen der grundlagenorientierten Teilprojekte des Teilclusters 1. In M2.2 wurden deren Auswirkung auf das Verhalten der Kolbengruppe untersucht und quantifiziert. Die gewonnenen Daten dienen dem Gesamtsimulationsmodell im Teilprojekt A2.1 als Datenbasis zur Berechnung der Reibungsverluste der Kolbengruppe. Um die Projektziele zu ermöglichen wurden Simulationsmodelle zur Berechnung der Kolbendynamik (PIMO3D) und der Kolbenringdynamik (KORI3D) aufgebaut und unter Verwendung von Stripmessungen der Daimler AG validiert. Zur Analyse und Bewertung der Reibungsreduktionspotentiale sind Variationsrechnungen mit geänderten Randbedingungen in einem breiten Motorkennfeld durchgeführt und im NEFZ quantifiziert worden.

Innerhalb der beiden Programmsysteme wurden detaillierte Untersuchungen bezüglich des Einflusses unterschiedlicher Schmierstoffe, des Honwinkels und der Beschichtung auf der Zylinderlaufbahn durchgeführt. Darüber hinaus erfolgten komponentenspezifische Untersuchungen der Kolbenringvorspannung, der Ringgeometrie sowie des Kolbenspiels, der Schaftballigkeit am Kolben und des Schmierstoffangebots auf der Zylinderlaufbahn.

In den Untersuchungen zeigte sich für das Kolbenringpaket, dass die Parameter Ringvorspannung, Reibungskoeffizient im Kontakt Ring/Zylinder sowie die Zylinderhonstruktur einen signifikanten Einfluss auf das Reibungsverhalten besitzen. Am Kolben besitzen die Parameter Kolbenpiel und Schmierstoffangebot ein großes Potential zur Reibungsreduktion.

Durch die Kombination der beschriebenen Maßnahmen konnte eine optimale Konfiguration für die Kolbengruppe gefunden werden, die sich aus dem Schmierstoff FMB, dem Honkonzept mit einer reduzierten Kolbenringvorspannung sowie einem erhöhten Kolbenpiel und reduziertem Schmierstoffangebot zusammensetzt. Diese Konfiguration ergibt für die Kolbengruppe im NEFZ eine Reibungsreduktion zur Ausgangsvariante um ca. 35%.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Berichtsumfang: 59 S., 59 Abb., 3 Tab., 7 Lit.

Beginn der Arbeiten: 01.10.2008

Ende der Arbeiten: 30.09.2012

Zuschussgeber: Das Vorhaben wurde im Rahmen des CO₂-Sonderforschungsprogramm der Forschungsvereinigungen Antriebstechnik (FVA) und Verbrennungskraftmaschinen (FVV) durch Industriemittel finanziert.

Low Friction Powertrain – Teilprojekt M3.1

Vorhaben Nr. 977

Gleitlagerung im Kurbeltrieb

Abschlussbericht

Kurzfassung:

Durch die Umsetzung von "Downsizing" (Kompensation der Hubvolumenverkleinerung durch Steigerung der spezifischen Leistung) werden die Kurbelwellengleitlagerstellen eines Verbrennungsmotors zunehmend höher belastet. Die übliche Kompensation durch Lagerdurchmesserergrößerung wirkt sich nachteilig auf das Reibungsverhalten aus und erfordert zudem einen höheren Öldurchsatz. Zusätzliche Start-Stopp-Funktionen zur CO₂-Reduzierung führen zu einer deutlichen Steigerung der Anzahl von Motorstarts und -hochläufen. Der steigenden Lagerbelastung entgegen steht die Forderung nach „weichen“ Oberflächen, zur Einbettung von Verunreinigungen. Gelingt es nun die Lagertragfähigkeit durch Materialpaarung und Geometrie zu erhöhen und gleichzeitig die Forderung nach „Einbettfähigkeit“ durch die Materialkombination „hart/hart“ mit Hilfe von Beschichtungen zu umgehen, ergeben sich neue Wege die Reibung von Gleitlagern bei gestiegenen Anforderungen zu senken.

Ziel dieses Teilprojektes war es, durch eine Erhöhung der maximalen Lagertragfähigkeit mittels angepasster Laufsichten und Materialpaarungen, die Reibungsminderung durch Lagergeometrieoptimierung zu erforschen. Am IOT wurden hierzu Grundlagenuntersuchungen durchgeführt, die das Reibungsverhalten verschiedener Beschichtungen und Öle untersuchen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sowie die im Teilprojekt M3.5 durch Simulationen ermittelten optimierten Lagergeometrien dienten als Grundlage zur Auslegung neuer Hauptlagerschalendesigns. Das Reibungsverhalten dieser verschiedenen Hauptlagergeometrien bzw. -oberflächen wurde am VKA durch Messung des Reibmoments einer geschleppten Kurbelwelle an einem speziellen Komponentenprüfstand analysiert. Um das Reibungsverhalten unter Lasteinfluss zu untersuchen, wurden im Teilprojekt M3.5 außerdem Versuche auf einem speziellen Lagerprüfstand durchgeführt. Die in den Teilprojekten M3.1 und M3.5 ermittelten Ergebnisse wurden in das Gesamtsimulationsmodell aus Teilprojekt A2.1 integriert. Hier ergibt sich je nach Kombination mit anderen reibungsreduzierenden Maßnahmen eine kumulierte Reduktion der Motorgesamtreibung von bis zu ca. 0,8 % für die in der Makrogeometrie optimierten Hauptlager in Kombination mit einer Beschichtung mit ZrC₉.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Berichtsumfang:	56 S., 62 Abb., 5 Tab., 26 Lit.
Beginn der Arbeiten:	01.10.2008
Ende der Arbeiten:	30.09.2012
Zuschussgeber:	BMW über AiF; IGF-Nr. 15794 N

Low Friction Powertrain – Teilprojekt M3.2

Vorhaben Nr. 976

Akustik Wälzlagerung Kurbeltrieb

Abschlussbericht

Kurzfassung:

Die mechanischen Verluste im Verbrennungsmotor haben einen erheblichen Anteil am Kraftstoffverbrauch. Neben der Kolbenbaugruppe besitzen die Haupt- und Pleuellager in der Regel den größten Einzelbeitrag an der Reibleistung. Eine Umstellung von Gleit- auf Wälzlager bietet deutliches Potenzial zur Reibungsreduktion und damit zur Kraftstoffverbrauchssenkung. Durch den Einsatz von Wälzlagern im Kurbeltrieb ergeben sich jedoch auch Herausforderungen, die neben der Dauerhaltbarkeit, Fertigung und Montage die Akustik betreffen.

Im Hinblick auf die Akustik, die im Fokus des vorliegenden Forschungsvorhabens stand, sind zum einen das im Vergleich zum Gleitlager oftmals ungünstigere, weil direktere Körperschallübertragungsverhalten und zum anderen die zusätzliche Geräuschanregung des Wälzlagers infolge der Wälzkörperdynamik zu berücksichtigen. Den akustischen Herausforderungen sollte daher mit einer optimierten Auslegung von Kurbeltrieb, Lagerung und angrenzender Gehäusestruktur begegnet werden.

Um das akustische Verhalten von wälzgelagerten Kurbeltrieben bereits in frühen Entwicklungsphasen analysieren und optimieren zu können, wurde ein modular aufgebautes strukturdynamisches Mehrkörpermodell entwickelt, das die Simulation des dynamischen und akustischen Verhaltens erlaubt. Durch die geschlossene Berechnung von Wälzlager-, Kurbeltriebs- und Strukturmechanik bietet das Modell die Möglichkeit, die Körperschallanregung und -übertragung im wälzgelagerten Motor unter Berücksichtigung der Interaktion von Kurbelwelle, Wälzlager und Motorstruktur zu untersuchen. Zur Überprüfung der Modellgüte wurden die Simulationsergebnisse anhand von begleitenden Akustikmessungen auf einem Motorenprüfstand validiert. Gleichzeitig wurden beispielhaft Variantenrechnungen durchgeführt, um akustische Verbesserungspotenziale aufzudecken. Der Simulationsansatz stellt damit ein Hilfsmittel dar, mit dem das akustische Verhalten von wälzgelagerten Kurbeltrieben bereits in frühen Entwicklungsphasen konstruktionsbegleitend simuliert und optimiert werden kann.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Berichtsumfang:	80 S., 54 Abb., 7 Tab., 32 Lit.
Beginn der Arbeiten:	01.10.2008
Ende der Arbeiten:	30.09.2012
Zuschussgeber:	BMW über AiF; IGF-Nr. 15795 N

Low Friction Powertrain – Teilprojekt M3.3

Vorhaben Nr. 983

Energetisch optimierte Ölversorgung von Tribosystemen im Verbrennungsmotor

Abschlussbericht

Kurzfassung:

Bei der Auslegung von Gleitlagern werden für die Ölversorgung standardmäßig feste Randbedingungen für den Zuführdruck bzw. die Ölmenge vorgegeben, die auf Erfahrungen basieren oder aus Messungen bekannt sind. Zur Ermittlung der Optimierungspotentiale einer bedarfsgerechten Ölversorgung des Schmierölkreislaufes zur Versorgung der Pleuellager wurden die Systemgrenze der EHD-Simulationstechniken bzgl. der Ölversorgung um die Möglichkeit erweitert, den Einfluss der Leitungswiderstände in den Ölleitung sowie der Pumpencharakter zu berücksichtigen. Des Weiteren ist es nunmehr möglich auch die Ölversorgung zwischen Grund- und Pleuellager gekoppelt in die Modellbildung einzubeziehen.

Die Gesamtproblematik erfordert es hierbei die beiden Subsysteme - hydrodynamische Schmierfilmbildung in Gleitlagern und Hydrauliknetzwerk - gekoppelt zu betrachten. Hierzu werden die etablierten Softwaretools zur Auslegung von Motorenlagern FIRST und von Hydrauliknetzwerken DSH^{plus} über das Konzept des Gleichungs-Exports bzw. -Imports gekoppelt, indem die Modellgleichungen des hydraulischen Submodells in die Gleitlagermodule integriert werden.

Bei einer bedarfsgerechten Ölversorgung der Gleitlager bieten sich somit aus energetischer Sicht Optimierungspotentiale welche den Pumpenantrieb betreffen. Bei einer Reduzierung der Ölversorgung sind jedoch mögliche Auswirkungen auf die tribo-mechanische Beanspruchung der Gleitlager zu beachten, da infolge der geringeren Wärmeabfuhr über das austretende Schmieröl die Lagertemperaturen ansteigen und sich somit die Grenze zur Mischreibung verringert.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Berichtsumfang:	51 S., 44 Abb., 11 Lit.
Beginn der Arbeiten:	01.10.2010
Ende der Arbeiten:	30.09.2012
Zuschussgeber:	Das Vorhaben wurde im Rahmen des CO2-Sonderforschungsprogramm der Forschungsvereinigungen Antriebstechnik (FVA) und Verbrennungskraftmaschinen (FVV) durch Industriemittel finanziert.

Low Friction Powertrain - Teilprojekt M3.4

Vorhaben Nr. 977

Drehzahlhochlauf - Hochlaufsimulation thermomechanisch/elastohydrodynamischer gekoppelter Tribosysteme im Zeitbereich

Abschlussbericht

Kurzfassung:

Die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und damit auch des CO₂-Ausstoßes gehört durch immer strenger werdende Abgasrichtlinien der Europäischen Union mittlerweile zu den wichtigsten Zielen in der Fahrzeug- und Motorenentwicklung. Ein Baustein um dies zu erreichen ist die Optimierung bzgl. der Reibungsverluste der tribologischen Systeme, um somit den Wirkungsgrad zu steigern. Im Rahmen des Clusterprojektes *Low Friction Powertrain* sollen diesbezüglich unterschiedliche Ansätze verfolgt werden.

Zentrales Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens ist die Methodenentwicklung zur Erweiterung vorhandener Simulationstechniken im Bereich *transient-stationärer tribomechanischer Mehrkörpersysteme* auf *transient-instationäre thermo-tribomechanische Mehrkörpersysteme*. Bei der Entwicklung der methodischen Ansätze und Verfahren soll auf die Umsetzbarkeit in vorhandene EHD/MKS-Simulationsumgebungen geachtet werden.

Die neuentwickelten numerischen Methoden werden am Beispiel einer einfachen 2-dimensionalen Geometrie und anhand einer zweifach hydrodynamisch gelagerten Welle mit Lagerbock hinsichtlich ihrer Performance getestet.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Berichtsumfang:	67 S., 48 Abb., 2 Tab., 39 Lit.
Beginn der Arbeiten:	01.10.2008
Ende der Arbeiten:	30.09.2012
Zuschussgeber:	BMW über AiF; IGF-Nr. 15796 N/1

Low Friction Powertrain – Teilprojekt M3.5

Vorhaben Nr. 978

Reibungsoptimierung der Kurbelwellengleitlager

Abschlussbericht

Kurzfassung:

Die Reduktion von Kraftstoffverbrauch und damit auch von CO₂-Ausstoß gehört durch immer strenger werdende Abgasrichtlinien der Europäischen Union mittlerweile zu den wichtigsten Zielen in der Fahrzeug- und Motorenentwicklung. Ein Baustein um dies zu erreichen ist die Optimierung bzgl. der Reibungsverluste der tribologischen Systeme, um somit den Wirkungsgrad zu steigern. Im Rahmen des Clusterprojektes *Low Friction Powertrain* sollen diesbezüglich unterschiedliche Ansätze verfolgt werden.

In Teilprojekt M3.5 wird die Auswirkung veränderter thermischer Randbedingungen infolge von Eingriffen in das Thermomanagement auf die tribologischen Beanspruchungszustände in Motorgleitlagern und damit auf die Reibungsverluste untersucht. Dazu werden geeignete Parameter zur Reduktion der Reibleistung bestimmt und der Einfluss auf neue Fahrzyklen wie den NEFZ detektiert. Hierbei ist der Einfluss der Oberflächentopographie und deren Veränderung, abhängig von den Betriebsbedingungen und den Schmierstoffkennwerten von besonderem Interesse. Auf dem erweiterten Kenntnisstand aufbauend sollen die bisherigen Auslegungsverfahren um notwendige Kennwerte erweitert werden, die den veränderten Anforderungen gerecht werden.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.

Berichtsumfang:	53 S., 49 Abb., 2 Tab., 44 Lit.
Beginn der Arbeiten:	01.04.2009
Ende der Arbeiten:	30.09.2012
Zuschussgeber:	BMW über AiF; IGF-Nr. 15797N/1

Low Friction Powertrain - Teilprojekt M3.6

Vorhaben Nr. 979

Grundlagen reibungsarmer Wälzlager

Abschlussbericht

Kurzfassung:

In diesem Vorhaben wurden die Grundlagen für den Einsatz von Wälzlagern im Umfeld von Verbrennungsmotoren von drei Forschungsstellen, dem IMKT der Leibniz Universität Hannover, dem MEGT der TU Kaiserslautern und dem IMK der Universität Kassel, untersucht.

Hauptziel war, das Potential herauszuarbeiten, welches die Wälzlager bezüglich Reibung besitzen, wenn man mit diesen im Verbrennungsmotor die Gleitlager substituiert. Weiterer wichtiger Punkt im Vorhaben war die Überprüfung auf schädigende Betriebszustände, die durch die Kinematik im Verbrennungsmotor hervorgerufen werden könnten.

Am Lehrstuhl für Maschinenkonstruktion und Tribologie (IMKT) wurde mittels Prüfstandversuchen nachgewiesen, dass sowohl in Bezug auf Käfigschlupf, Wälzkörperschlupf sowie Axial Schub, der Einsatz unter Bedingungen ähnlich dem Verbrennungsmotor unkritisch sind. Zwar kann sich der Wälzkörperschlupf bei niedrigen Drehzahlen zeitweise stark ausbilden, verringert sich aber unter Last. Bei hohen Drehzahlen verhindern die Fliehkräfte und somit der durchgehende Laufbahnkontakt eine messbare Ausbildung. Dies konnte durch Simulation bestätigt werden. Beim Käfigschlupf ist keine besondere Ausprägung feststellbar. Der Axial Schub kann zwar bei höheren Drehzahlen erhöhte Spitzenwerte erreichen, aufgrund der umlaufenden Lastzone kann sich dieser nicht dauerhaft aufbauen. Es ist deswegen nicht damit zu rechnen, dass ein geschränkter Wälzkörper längere Zeit gegen den Lagerbord anläuft und dabei hohe Bordkontaktkräfte aufbaut. Hinsichtlich der Mischreibung ließ sich feststellen, dass die untersuchten Lager mit dem Motorenöl die errechnete $L_{10,R}$ erreichten.

Um eine Wälzlagerberechnung in eine integrale Motorberechnung integrieren zu können, wurde am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebetechnik (MEGT) ein Wälzlagermodul entwickelt, welches anstatt der generell benutzten Gleitlagerberechnungen eingesetzt werden kann. Das in dem Fortran-Modul eingesetzte Kennfeld wurde durch Mehrkörpersimulationen von zwei Lagergrößen (Haupt- und Pleuellager) ermittelt.

Am Institut für Maschinenelemente und Konstruktionstechnik (IMK) konnte das Wälzlagermodul des MEGT in die Motorsimulation FIRST eingesetzt werden und damit die Reibung in Gleit- und Wälzlagerung direkt und unter identischen Randbedingungen verglichen werden. Bei den Hauptlagern ergibt sich ein sehr hohes Reibungseinsparpotential, bei den Pleuellagern hängt dieses erheblich von der Temperatur des Schmierstoffs ab. Bei hoher Schmierstofftemperatur konnten im untersuchten Fall noch 15% Reibungsminderung prognostiziert werden.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht / ~~ist nicht erreicht~~ worden.