



Meta Motoren- und Energie-Technik GmbH
Kaiserstr. 100
52134 Herzogenrath

Abschlussbericht:

Weiterentwicklung einer innovativen Lagerung des Kurbeltriebes
von Verbrennungsmotoren hinsichtlich des Potenzials zur
Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs – Folgeprojekt (Phase 2)

gefördert unter dem AZ: 25518/02 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. Michael Kier
Dipl.-Ing. Stefan Wegner
Dipl.-Ing. Ralf Bey

Herzogenrath, Januar 2013



Bezugsquelle:

Meta Motoren- und Energie-Technik GmbH
Kaiserstr. 100

D-52134 Herzogenrath

Meta Motoren- und Energie-Technik GmbH
Kaiserstr. 100
52134 Herzogenrath

Weiterentwicklung einer innovativen Lagerung des Kurbeltriebes
von Verbrennungsmotoren hinsichtlich des Potenzials zur
Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs – Folgeprojekt (Phase 2)

Abschlussbericht des Entwicklungsprojekts,
gefördert unter dem AZ: 25518/02 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. Michael Kier
Dipl.-Ing. Stefan Wegner
Dipl.-Ing. Ralf Bey

Herzogenrath, Januar 2013

10/97		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt		UMWELT STIFTUNG 	
Az	25518/02	Referat	24/0	Fördersumme	175.000 EURO
				Nachbewilligung	--
Antragstitel		Weiterentwicklung einer innovativen Lagerung des Kurbeltriebs von Verbrennungsmotoren hinsichtlich des Potenzials zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs			
Stichworte		Lagertechnik, CO ₂ Reduzierung, Reibungsreduktion, hochbelastbar			
Laufzeit		Projektbeginn		Projektende	
18 Monate		16.06.2011		15.12.2012	
				Projektphase(n)	
				2	
Zwischenberichte					
Bewilligungsempfänger		Meta Motoren- und Energie-Technik GmbH Kaiserstraße 100 52134 Herzogenrath		Tel 02407/9554-46 Fax 02407/9554-19	
				Projektleitung Herr Dipl.-Ing. Michael Kier	
				Bearbeiter Herr Dipl.-Ing. Stefan Wegner Herr Dipl.-Ing. Michael Kier	
Kooperationspartner					
 Zielsetzung und Anlass des Vorhabens <p>Gegenstand des beantragten Forschungsvorhabens ist die Weiterentwicklung eines völlig neuartigen Konzeptes zur reibungsarmen Lagerung dynamisch hoch beanspruchter Wellen, hier am Beispiel einer Kurbelwelle eines Verbrennungsmotors. Ziel im Rahmen des Vorhabens ist, die Weiterentwicklung des Konzeptes, hinsichtlich seiner Eignung zur signifikanten Verringerung der Reibung, auf Basis des zuvor durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt geförderten Vorhabens mit dem Aktenzeichen AZ 25518/01. Die Lagerung der Kurbelwelle eines Verbrennungsmotors stellt durch die Vielfalt der auftretenden Belastungszustände und der Dynamik ein ideales Anwendungsbeispiel dar, in dem konventionelle Wälzlager ihre Grenzen finden. Die Adaptive Bearing (AB) Lagerung ist eine Kombination aus Wälz- und Gleitlager und stellt eine völlig neue Lagertechnik dar, indem sie den Vorteil der reibungsarmen Wälzlagertechnik mit dem Vorteil der Belastbarkeit konventioneller Gleitlager verbindet. Die Nachteile der geringen Belastbarkeit von Wälzlagern und die hohe Reibung von Gleitlagern werden mit dem AB gezielt durch die patentierte Konstruktion vermieden. Mit dem AB Lagerungskonzept ist über die Konstruktion und Auslegung beabsichtigt, die reibungsarme Wälzlagertechnik für durch hohe Lasten bisher nicht zugängliche Anwendungsbereiche nutzbar zu machen. In dem Anwendungsfall der AB Lagerung eines Kurbeltriebs soll die Reibleistung eines Verbrennungsmotors, die in Betriebspunkten niedriger Last bis zu 40% der Gesamtleistung betragen kann, deutlich verringert werden. Ziel des Vorhabens ist die Optimierung und Weiterentwicklung der adaptiven Lagerung basierend auf den Erkenntnissen des vorherigen Vorhabens. Hierbei sind vor allem die Optimierung der Wälzkörperführung durch den Käfig und die Vereinfachung der Fertigung zu nennen.</p> <p>Nach der Entwicklung und Bewertung der Varianten auf dem in dem vorherigen Vorhaben entwickelten Lagerprüfstand wird der komplette Verbrennungsmotor im Kurbeltrieb mit der adaptiven Lagerung ausgestattet und auf dem Mechanik-Prüfstand vermessen. Anschließend wird der komplette Motor unter realen Betriebsbedingungen am gefeuerten Thermodynamikprüfstand vermessen und bewertet. Als Hauptkriterium zur Bewertung gilt die auf dem Thermodynamikprüfstand ermittelte Verbrauchsreduzierung, die unmittelbar mit einer Reduzierung der Emissionen gleichzusetzen ist.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de					

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

- Erarbeitung von Konzepten zur Verbesserung der Rollenführung
 - Recherche, Ermittlung und Konzeptionierung von Rollenführungssystemen
 - Vergleich und Analyse der Systeme und Möglichkeiten
 - Bewertung zur Realisierung in dem bestehenden Bauraum
- Verbesserung des Abrollverhaltens der Wälzkörper
 - Vermeidung von geometrischer Inhomogenität beim Abrollen der Wälzkörper
 - Reduzierung von Spannungsspitzen in der Struktur der Wälzkörper
- Optimierung der Lagerstruktur:
 - Beseitigung von Geometriestellen mit Kerbwirkungsfaktor
 - Optimierung der Struktur in Pleuel- und Hauptlager für den Härteprozess
- Reibungsarme Axialführung der Kurbelwelle
 - Ersatz der konventionellen Gleit-Axialführung der Kurbelwelle durch eine reibungsarme Wälzlager Führung
- Verbesserung des in der ersten Programmphase entwickelten Lagerprüfstands
 - Optimierung der Laufruhe und Messgenauigkeit
 - Ersatz von verschlissenen Komponenten des Prüfstands
- Entwicklung des adaptiven Lagers am Lagerprüfstand
 - Fertigung der neuen Käfigvarianten
 - Montagetests
 - Tests und Messungen der neuen Käfigvarianten bei verschiedenen Lasten, Drehzahlen und Öltemperaturen
 - Bewertung der Varianten und Auswahl des Zielkonzeptes
- Integration der adaptiven Lagerung in den Komplettmotor
 - Vereinfachung der Geometrie des adaptiven Pleuels und der adaptiven Hauptlager zur Vermeidung von Ausschuss in der Fertigung
 - Integration der neuen adaptiven Lagerung in den Komplettmotor
 - Integration der axialen Wälzlagerung der Kurbelwelle in den Motor
 - Detailkonstruktion
- Fertigung der erforderlichen Komponenten
- Messungen und Untersuchungen am Mechanik-Prüfstand (Schlepp-Prüfstand)
- Messungen und Untersuchungen am Thermodynamik-Prüfstand (Motor-Prüfstand)

Zum Projektabschluss steht die Bewertung der adaptiven Lagerung hinsichtlich des Potenzials zur Minderung der Reibleistung und Emissionen. Weiterhin wird die Haltbarkeit bewertet.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

- Ausstellung und Präsentation der Technik auf dem Internationalen Wiener Motorensymposium 2011, 2012
- Ausstellung und Präsentation der Technik auf dem Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2011, 2012
- Fachvorträge und Präsentationen der Technik gegenüber potenziellen Kunden

Fazit

Die Führung der Wälzkörper konnte durch das neue Käfigkonzept signifikant verbessert werden. Dies zeigte sich bereits in den Konzeptuntersuchungen am Lagerprüfstand in einer deutlich verbesserten Laufruhe und einer nochmaligen Absenkung der Reibleistung gegenüber der vorherigen Baustufe. Die verbleibenden Axialbewegungen in der Hauptlagerung des Vollmotors werden über die axiale Führung der Kurbelwelle mit einer Wälzlagerung reibungsarm abgefangen.

Das weiterentwickelte adaptive Lager konnte in den relevanten Punkten deutlich verbessert werden, weist aber insbesondere auf dem Schlepp- und Thermodynamik-Prüfstand noch nicht die erwarteten Reibungsvorteile auf.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	4
Verzeichnis von Bildern und Tabellen	5
Verzeichnis von Begriffen und Definitionen	6
Literaturverzeichnis	6
1. Zusammenfassung	7
2. Einleitung	8
3. Hauptteil	
3.1. AB-Lagerentwicklung	11
3.2. Messungen am Lagerprüfstand	14
3.3. Konstruktive Motorintegration	17
3.4. Adaptiv gelagerter Motor am Schlepp-Prüfstand	23
3.5. Adaptiv gelagerter Motor am Thermodynamik-Prüfstand	27
4. Fazit	30
5. Veröffentlichungen	31

Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Seite

Bild 1: Reibanteile von Motorkomponenten über Drehzahl – betriebswarmer Motor ...	8
Bild 2: Arbeitsbereiche im AB-Lager, CAD-Modell AB-Pleuellager	9
Bild 3: Wirkprinzip der taumelnden Rolle im Scheibenkäfig	11
Bild 4: Verschweißen des Rollenkäfigs	12
Bild 5: Zusammenbau des Prüflagers mit Rollen-Innenführung	13
Bild 6: Zusammenbau des Prüflagers mit Rollen-Außenführung	13
Bild 7: Vergleich der Käfigkonzepte	14
Bild 8: Optimierung des Lagerprüfstands	15
Bild 9: Neufertigung Wellenverbund Lagerprüfstand	15
Bild 10: Referenzmessungen am Lagerprüfstand	16
Bild 11: Reibmomentmessungen Lagerprüfstand	16
Bild 12: Vergleich Reibleistungsvorteil bei 2,7 kN	17
Bild 13: Fertigungsschäden an Pleuel	18
Bild 14: Belastungen Scheibenkäfig Nut in Pleuel – AB Phase 1	19
Bild 15: Aktuelles AB-Pleuel, Zusammenbau und Schnitt	19
Bild 16: Aktuelles Pleuel mit adaptiver Lagerung	20
Bild 17: Aktuelles AB-Hauptlager, Zusammenbau und Schnitt	20
Bild 18: Aktueller Hauptlagerring mit adaptiver Lagerung	21
Bild 19: Längsschnitt durch Kurbeltrieb mit adaptiver Lagerung	21
Bild 20: Kurbelwellen Axiallager	22
Bild 21: Gefertigte Axiallagerung	23
Bild 22: Pleuel mit neuer adaptiver Lagerung	23
Bild 23: Hauptlagerring mit neuer adaptiver Lagerung	24
Bild 24: Adaptiv gelagerter Vollmotor auf Mechanik-Prüfstand (Schlepp-Prüfstand) .	24
Bild 25: Schleppmessungen des adaptiv gelagerten Motors	24
Bild 26: Adaptiv gelagerter Motor am Thermodynamik-Prüfstand	24
Bild 27: Prozentuale Änderung des Kraftstoffverbrauchs durch adaptive Lagerung ..	24
Bild 28: Prozentuale Änderung Kraftstoffverbrauch AB-Lagerung aus Phase 1	24

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

Verwendete Abkürzungen:

AB	Adaptive Bearing
GL	Gleitlager
KW	Kurbelwelle
p_{mr}	Reibmitteldruck
p_{mi}	indizierter Mitteldruck
p_{me}	effektiver Mitteldruck
NEFZ	Neuer europäischer Fahrzyklus
FEM	Finite Elemente Methode

Literaturverzeichnis

- [1] Schaeffler – www.schaeffler.com
Kreative Technik für Automobile
- [2] Dipl.-Ing. C. Tiermann, Dipl.-Ing. M. Kalenborn, Dr.-Ing. K. Orlowsky, Dr.-Ing. C. Steffens, Dr.-Ing. W. Bick
Ein effektiver Weg zur Verbrauchsreduktion – Wälzlagerung im Verbrennungsmotor
MTZ 04/2007
- [3] J. Affenzeller, H. Gläser
Lagerung und Schmierung von Verbrennungsmotoren
- [4] R. Golloch
Downsizing bei Verbrennungsmotoren
- [5] Prof. Dr.-Ing. T. Esch
Umweltprobleme der Kolbenmotoren
- [6] Richard van Basshuysen
Handbuch Verbrennungsmotor

1. Zusammenfassung

Die Optimierung aktueller und zukünftiger Verbrennungsmotoren hinsichtlich Effizienz und Schadstoffreduktion ist von bedeutender Umweltrelevanz. Dabei ist es sinnvoller, Emissionen zu vermeiden als Abgase aufwendig zu reinigen. Die Reibleistung von Verbrennungsmotoren zu reduzieren ist hier ein sehr wirksamer Ansatz.

Um dieses Ziel zu erreichen, hat die Firma Meta GmbH das adaptive Lager konzipiert, das auch bei Kurbeltrieben hochbelasteter Verbrennungsmotoren das Potenzial hat, die Reibleistung deutlich zu reduzieren.

In dem zuvor durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt geförderten Vorhaben (AZ 25518/01) wurden die Grundlagen der adaptiven Lagerung an einem Vollmotor entwickelt. Das hier beschriebene Vorhaben (AZ 25518/02) befasst sich mit der konsequenten Weiterentwicklung der Lagertechnik, um die Potenziale in den praxisrelevanten Bereichen an einem modernen aufgeladenen Ottomotor auszuweiten.

Die bereits bestehende solide Datenbasis und die erarbeiteten Entwicklungsmethoden stellen eine hervorragende Basis für die Weiterentwicklung der adaptiven Lagerung dar. Der Fokus der konsequenten Weiterentwicklung wurde dabei auf eine verbesserte Axialführung der Wälzkörper und die Vereinfachung der Pleuel- und Hauptlagerfertigung gelegt. Für eine bessere Rollenführung wurden verschiedene Käfigkonzepte konzipiert und untersucht, von denen eines mit einer Rollen-Außenführung als zielführend herausgearbeitet werden konnte. Die bereits bewährte Hohlrolle wurde aus dem ersten Programm konstruktiv und fertigungstechnisch übernommen. Neben der Reibungsreduktion konnte ein sehr ruhiger Axiallauf des Lagers am Lagerprüfstand ausgewiesen werden.

Diese Lagervariante wurde konstruktiv in den Zielmotor integriert. Dabei konnten zuvor aufwendige Fertigungsprozesse durch eine geänderte Konstruktion deutlich vereinfacht werden. Aufgrund dessen traten während der Bauteilfertigung keine Schäden mehr auf. Dies kann als wichtiger Schritt zur Gewinnung potenzieller Hersteller für die Serienproduktion gewertet werden.

Nach der Montage der adaptiven Lagerung und der neuen Axiallagerung am Vollmotor zeigte die manuelle Funktionskontrolle einen sehr leichtgängigen Lauf der Kurbelwelle. Im geschleppten Betrieb auf dem Mechanik-Prüfstand konnte in sämtlichen Temperatur- und Lastbereichen ein Vorteil gegenüber der Gleitlagerung des Basismotors und auch der letzten Baustufe der adaptiven Lagerung gemessen werden. Dieser befindet sich allerdings noch nicht auf dem theoretisch erreichbaren Niveau des Lagerprüfstands. In den nachfolgenden Untersuchungen am Thermodynamik-Prüfstand konnte ein ähnliches Verhalten beziffert werden. Gegenüber der vorherigen Variante der adaptiven Lagerung konnte das Reibniveau reduziert und der Vorteil in Bereichen niedriger Öltemperatur ausgebaut werden. Bei hohen Öltemperaturen konnte der Reibungsnachteil reduziert, aber nicht vermieden werden. Es ist wahrscheinlich, dass die zuvor bereits verzeichneten und durch die Gaskräfte angeregten Axialschwingungen der Kurbelwelle weiterhin zu einer Verspannung der Hauptlagerung und damit zu einer erhöhten Reibleistung führen.

Im Betrieb traten keine Schäden an der adaptiven Lagerung auf. Das akustische Verhalten kann durchweg als unauffällig bezeichnet werden.

Mit dem nach diesem Vorhaben bestehenden durchaus motivierenden Stand der Technik werden zukünftig potenzielle Industriepartner für die Weiterentwicklung der adaptiven Lagerung und die Spezifizierung der praxistauglichen Anwendung angesprochen.

2. Einleitung

In den letzten Jahren hat Kohlendioxid (CO₂) für die Automobilindustrie als klimaschädliches Abgas eine hohe Bedeutung gewonnen. Zukünftige Abgas-Gesetzgebungen und die direkte Kopplung von Kraftstoffverbrauch an CO₂-Emissionen erfordern die Umsetzung von verbrauchsreduzierenden Maßnahmen massiver denn je zuvor. Betrachtet man die Aufteilung der abgegebenen Motorleistung im verbrauchsrelevanten Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ), wird deutlich, dass die Motorreibung im zeitlich dominierenden Stadtverkehr einen Anteil von etwa 35 % hat. Ein theoretisch reibungsfreier Motor würde dementsprechend, bei konstantem inneren Wirkungsgrad, im Stadtverkehr 35 % weniger Kraftstoff verbrauchen und somit 35 % weniger CO₂ emittieren. Dieser Aspekt verdeutlicht, dass es eine wirkungsvolle Maßnahme ist, die Reibleistung von Verbrennungsmotoren zu reduzieren, um Emissionen zu mindern und wertvolle Ressourcen zu schonen.

Die Reibleistung eines Verbrennungsmotors hängt im Wesentlichen von der Drehzahl ab und lässt sich den Komponenten Ventiltrieb, Kolbengruppe, Wasserpumpe, Ölpumpe und Kurbeltrieb zuordnen (Bild 1).

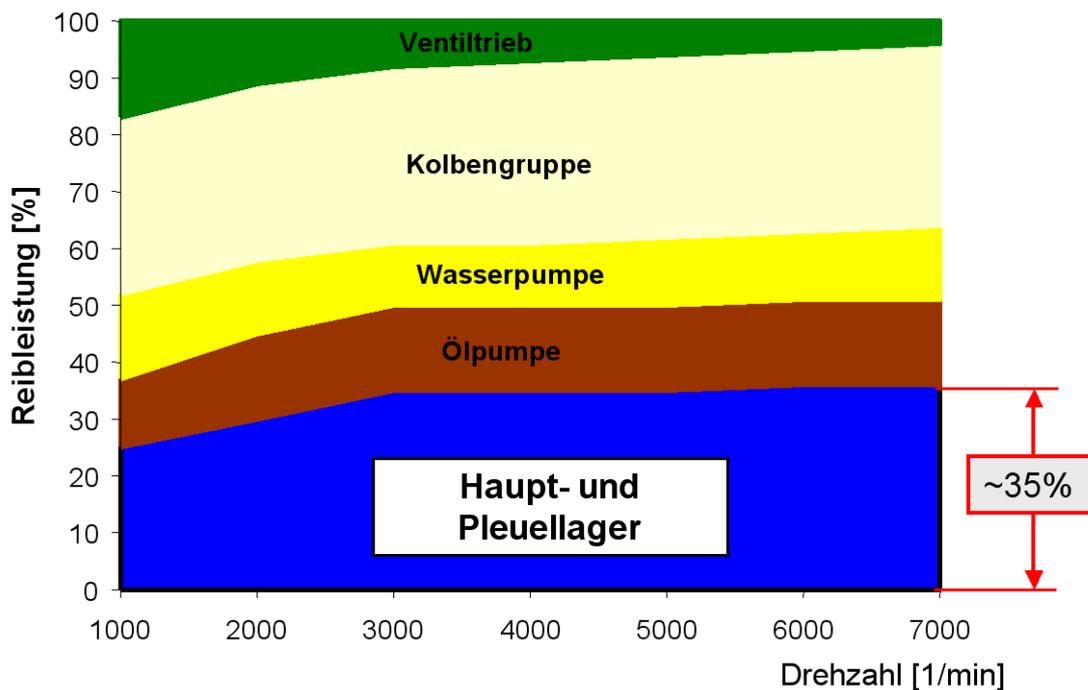


Bild 1: Reibanteile von Motorkomponenten über Drehzahl – betriebswarmer Motor

Um die Reibleistung zu reduzieren, hat sich in einigen Bereichen die Wälzlagerung bereits etabliert. So sind wälzgelagerte Rollenschlepphebel im Ventiltrieb bereits seit Jahren Stand der Technik.

Weiterhin haben wälzgelagerte Nocken- und Ausgleichswellen ihr Reibminderungspotenzial von etwa 50 % bewiesen [1] und eine serientaugliche Reife erlangt. Für den Anwendungsfall Kurbeltrieb, der neben der Kolbengruppe mit 35 % Anteil an der Gesamtreibleistung den Hauptverursacher von Reibung darstellt, gab es bisher nur zögerliche Vorstöße. So haben wälzgelagerte Kurbeltriebe zwar bereits ihr

Reibminderungspotenzial bewiesen [2], wurden bisher jedoch in nur relativ schwach belasteten Saugmotoren mit unter 100 Nm pro Liter Hubraum eingesetzt. Durch Downsizing weisen moderne Motoren bei hoher Aufladung kleinere Hubräume und hohe Zylinderdrücke auf. Hierdurch kommen spezifische Drehmomente von über 170 Nm pro Liter Hubraum zustande. Es kommt in den Haupt- und Pleuellagern zu Belastungsspitzen, die von Wälzlagern im vorhandenen Bauraum nicht mehr getragen werden können.

Um das vielversprechende Potenzial der reibungsarmen Lagerung von Kurbeltrieben dennoch zu erschließen, ist es notwendig, neue Ansätze zu verfolgen und neue Techniken zu entwickeln.

Die von der Firma Meta GmbH konzipierte Technik der adaptiven Lagerung (AB) stellt einen solch neuen Ansatz dar, die reibungsarme Wälzlagerung dauerhaft auch in hochbelastete Motoren zu integrieren.

Hydrodynamische Gleitlager weisen bei geringem Bauraumbedarf eine hohe Tragfähigkeit auf und sind bei ausreichender Gleitgeschwindigkeit unempfindlich gegen stoßartige Belastungen. Aufgrund dessen werden sie in allen modernen Verbrennungsmotoren im PKW-Bereich eingesetzt. Nachteilig ist jedoch die hohe Reibleistung, die mit Last und Drehzahl deutlich ansteigt.

Ein Gleitlager besitzt bei zentrischem Lauf der Welle eine sehr niedrige Steifigkeit, die erst zu großer Exzentrizität der Welle, und damit zu sehr kleinen Schmierfilmen hin, deutlich zunimmt. Dies führt dazu, dass die Welle im Gleitlager schon bei geringen Belastungen eine große Exzentrizität mit kleinen Schmierfilmen aufweist und damit ein ansteigendes Reibniveau erzeugt.

Wälzlager wiederum haben annähernd eine lineare Steifigkeit und ein sehr geringes Reibniveau. Steigt die Belastung an, vergrößert sich die Flächenpressung in den Kontaktflächen zwischen den Wälzkörpern und der Lauffläche. Wird dabei der materialspezifische Grenzwert überschritten, kommt es zu plastischen Deformationen und Lagerschäden. In einem wälzgelagerten Verbrennungsmotor tritt dieser kritische Betriebspunkt auf, wenn die Gaskraft die Lagerstellen belastet.

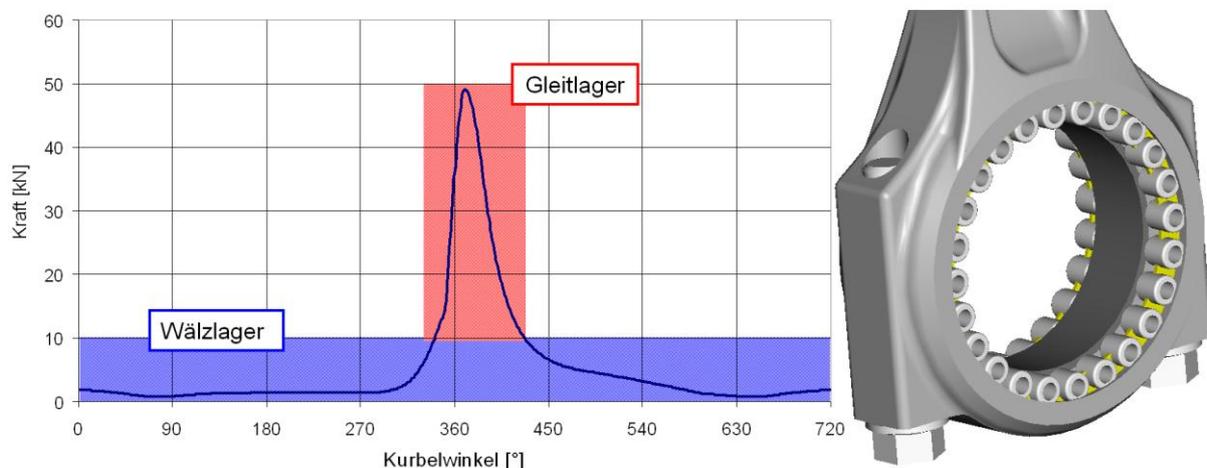


Bild 2: Arbeitsbereiche im AB-Lager, CAD-Modell AB-Pleuellager

Um das Wälzlager vor diesem kritischen Belastungszustand zu schützen, hat die Firma Meta GmbH das adaptive Lager konzipiert. Das adaptive Lager besteht aus einer Kombination von Wälz- und Gleitlagerung und macht sich deren unterschiedliche Steifigkeitsverläufe zunutze (Bild 2). Ist die Belastung des adaptiven Lagers gering, wird die Welle durch die Wälzlagerung zentrisch im Gleitlager geführt. So bleiben die Schmierspalt im Gleitlager groß und das Reibniveau niedrig. Mit ansteigender Last beginnen die Wälzkörper sich zu deformieren und der Schmierspalt im Gleitlager verkleinert sich, bis letztlich das Gleitlager die Tragfunktion übernimmt. In diesem Betriebszustand muss sich das Wälzlager immer noch im elastischen Deformationsbereich der Rollen der adaptiven Lagerung befinden. Die Steifigkeit des Gleitlagers ist dann so groß, dass sich die weitere Deformation für die Rollen der adaptiven Lagerung maximal in einem Bereich von 2 µm bewegt.

Ziel des Vorhabens ist die konsequente Weiterentwicklung der adaptiven Lagerung basierend auf den Erkenntnissen des vorherigen Projektes. Vorrangig sollen die Reibminderungspotenziale ausgeschöpft werden, indem das adaptive Lager, insbesondere die Rollenführung, optimiert wird. Zudem sollen unvermeidliche Axialbewegungen der Kurbelwelle reibungsarm abgefangen werden.

Zur Lösung der bestehenden Aufgabenstellungen wurden verschiedene Käfigkonzepte erarbeitet und in eine fertigbare Konstruktion überführt. Anschließende Untersuchungen auf dem Lagerprüfstand brachten eine zielführende Lösung hervor. Weiterhin beinhaltet das Projekt die bedarfsgerechte Konstruktion mit begleitender Simulation, die Fertigung der Komponenten, die Untersuchung auf dem Mechanik-Prüfstand und die Quantifizierung des Verbrauchs- und Emissionsvorteils unter realen Betriebsbedingungen auf dem Thermodynamik-Prüfstand.

Folgende zielführende Schritte wurden durchgeführt:

- Sammeln von Konzepten zur Optimierung der Rollenführung
- Konstruktiver Entwurf, Prüfen der Umsetzbarkeit und Ermitteln geeigneter Fertigungsverfahren für die Lagerkäfige
- Herstellen von Lagerkäfig-Prototypen, Tests und Messungen am Lagerprüfstand zur Ermittlung der zielführenden Konfiguration
- Konstruktion des überarbeiteten adaptiven Lagers für Kurbelwelle und Pleuel unter Berücksichtigung der Implementierung erforderlicher Messtechnik
- Konzeption und Konstruktion einer geeigneten reibungsarmen Axiallagerung der Kurbelwelle
- Fertigen aller erforderlichen Bauteile für Lager und Motor inklusive Ersatzteilen
- Systemvorbereitung, Applizieren der Messtechnik für Tests und Messungen auf dem Mechanik-Prüfstand
- Tests und Messungen auf dem Mechanik- und Thermodynamik-Prüfstand unter realen Betriebsbedingungen wie hoher Drehzahlen und hoher Lasten
- Abschließende Systembewertung nach Verbrauch (Emissionsminderungspotenzial), Haltbarkeit, akustischem Verhalten und Umsetzbarkeit

3. Hauptteil

3.1 AB-Lagerentwicklung:

Innerhalb des vorherigen Vorhabens (AZ 25518-24/0) wurden die Grundlagen der Wälz- und Gleitlagerung sehr intensiv untersucht und vor allem hinsichtlich der spezifischen Anforderungen der adaptiven Lagerung entwickelt. Die bei den Untersuchungen als zielführend definierte Hohlrolle hat sich dabei durch ihre Kombination aus Elastizität und Belastbarkeit im weiteren Projektverlauf als geeignete Lösung bewährt. Auch das für die Prototypen bisher verwendete Verfahren der gekauften Serien-Wälzkörper mit der aus Massenanwendungen bewährten äußeren Geometrie der Rolle soll weiter übernommen werden. Die anschließende Anbringung der Bohrung erfolgt ebenfalls weiterhin mit dem Erodier-Verfahren. Um das Abrollverhalten zu verbessern, ist eine ebene und homogene Abrollfläche wünschenswert. Dies war in der bisherigen Ausführung des adaptiven Lagers durch die Nut des Scheibenkäfigs in der Lauffläche nicht gegeben. Die zuvor durch ihre Kompaktheit und reibungsgünstigen Eigenschaften als geeignet definierte Rollenführung durch einen Scheibenkäfig erwies sich im Verlauf des letzten Vorhabens in einigen Punkten als nachteilig. Als Erstes ist hier die nicht ausreichende Führung der Wälzkörper durch den alleinigen Kontakt des Scheibenkäfigs in der Mitte des Wälzkörpers zu nennen. Hierbei entsteht eine labile Lage, die vor allem im Motorbetrieb zu einer Schiefstellung der Wälzkörper führt und die Kurbelwelle damit in axiale Schwingungen versetzt. Bild 3 veranschaulicht das Taumeln der Rolle im Scheibenkäfig.

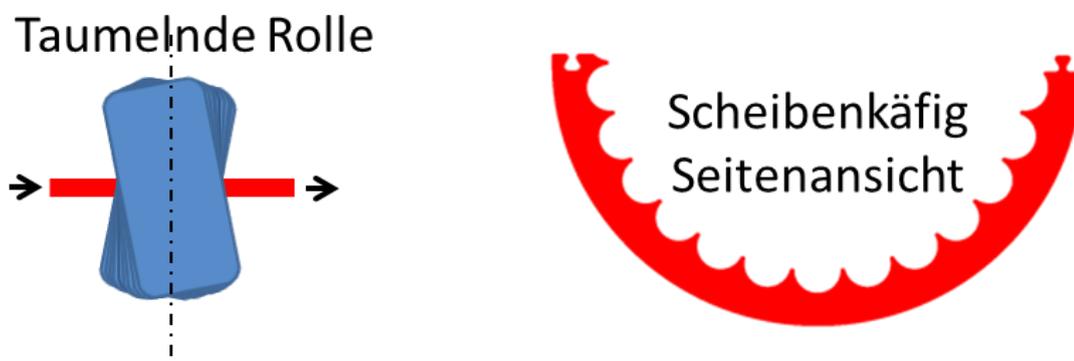


Bild 3: Wirkprinzip der taumelnden Rolle im Scheibenkäfig

Über die axialen Schwingungen der Kurbelwelle wird das Axiallager der Kurbelwelle entsprechend belastet, was wiederum zu einer Erhöhung der Reibung führt. Dass Wälzlager einen größeren Axial Schub verursachen als Gleitlager, liegt dem Wirkprinzip zugrunde und lässt sich nicht gänzlich vermeiden. Die Anregung wird jedoch umso geringer, je besser die Führung der Wälzkörper durch den Käfig ist. Die dann noch verbleibenden Axialbewegungen müssen durch eine reibungsarme axiale Lagerung der Kurbelwelle, beispielsweise eine Wälzlagerung, abgefangen werden.

Eine intensive Konzept- und Recherchephase brachte zwei zielführende Ansätze hervor. Durch die hohlen Wälzkörper ist die Wälzkörper-Innenführung möglich, was bei konventionellen Wälzlagern nicht gegeben ist.

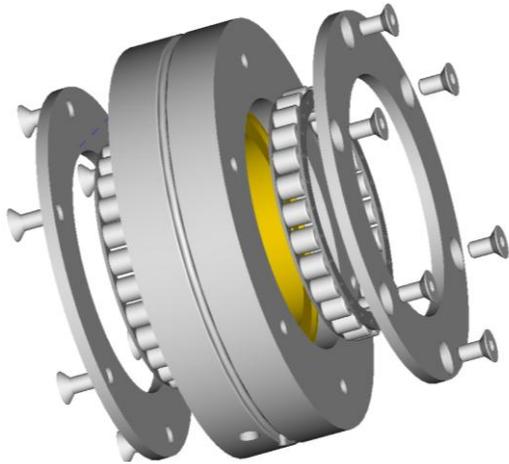
Hierbei wird ein Stift durch das Innere der Rolle geführt und an der Seite mit einer Axialscheibe verbunden. Zwischen dem 1 mm dicken Stift und der Rolle mit 3,5 mm Innendurchmesser wird weiterhin eine Hülse aufgebracht, um das Radialspiel auf das erforderliche Maß zu begrenzen. Da die axiale Baubreite des adaptiven Lagers nicht erhöht werden sollte und die Wälzkörper ebenfalls nicht in ihrer Breite reduziert werden sollten, um die Tragfähigkeit beizubehalten, war eine möglichst platzsparende Verbindungsmethode zwischen Stiften und Axialscheiben erforderlich. Um dies realisieren zu können, bot sich das Verfahren des Laserschweißens an. Dazu wurde eine Vorrichtung konstruiert und gefertigt, in der die Rollen im äquidistanten Abstand passend für die Axialscheiben gehalten werden. Die einzelnen Punkte zum Verschweißen können auf diesem Wege computergesteuert angefahren werden. Bild 4 zeigt die Vorrichtung und den verschweißten Rollenkäfig.



Bild 4: Verschweißen des Rollenkäfigs

Die verschweißten Rollenkäfige wurden anschließend entsprechend Bild 5 in das Testlager für den Lagerprüfstand integriert und für Tests und Messungen freigegeben.

Zusammenbau des Prüflagers



Prüflager

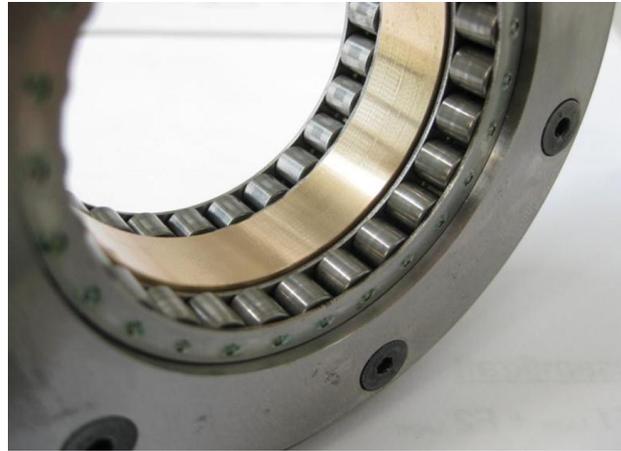
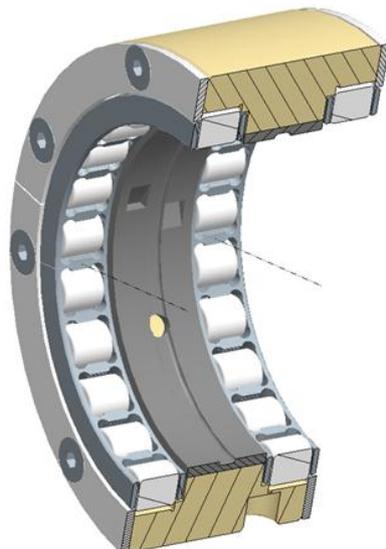


Bild 5: Zusammenbau des Prüflagers mit Rollen-Innenführung

Die zweite ausgewählte Käfigvariante beinhaltete eine Rollen-Außenführung durch einen gefrästen Messingkäfig. Dieser umfasst die Rollen auf der Außenseite über die gesamte Rollenbreite und gewährleistet auf diesem Wege eine präzise Führung der Rollen. Bild 6 zeigt die Ausführung des Rollenkäfigs und den Einbau in das Prüflager.

Zusammenbau des Prüflagers



Prüflager

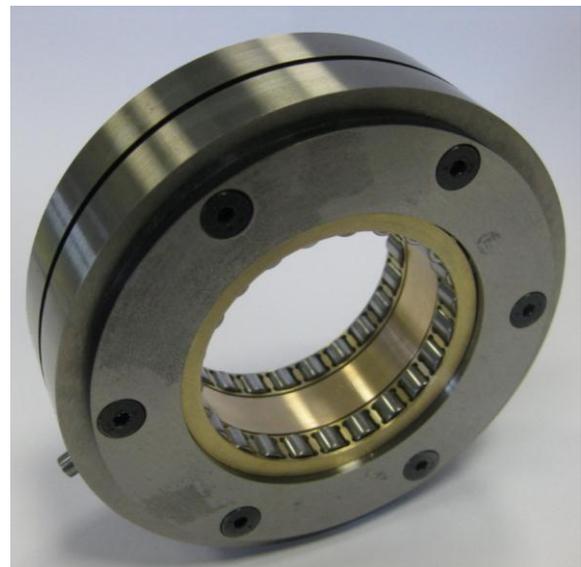


Bild 6: Zusammenbau des Prüflagers mit Rollen-Außenführung

Durch das Verfahren der Rollen-Außenführung werden die Rollen durch schmale Messingstege voneinander getrennt. Der erforderliche Bauraum dafür ist größer als bei den anderen Varianten. Aufgrund dessen musste die Anzahl der Rollen je Seite um eine Rolle verringert werden.

Das folgende Bild 7 zeigt zum Vergleich alle drei Käfigvarianten im Schnitt. Hierbei ist zu erkennen, dass für den Käfig mit Innenführung und den Käfig mit Außenführung das Gleitlager um 2 mm schmaler gemacht wurde. Dies kann als unkritisch angesehen werden, da in den bisherigen Untersuchungen beim Gleitlager keine Verschleißprobleme auftraten.

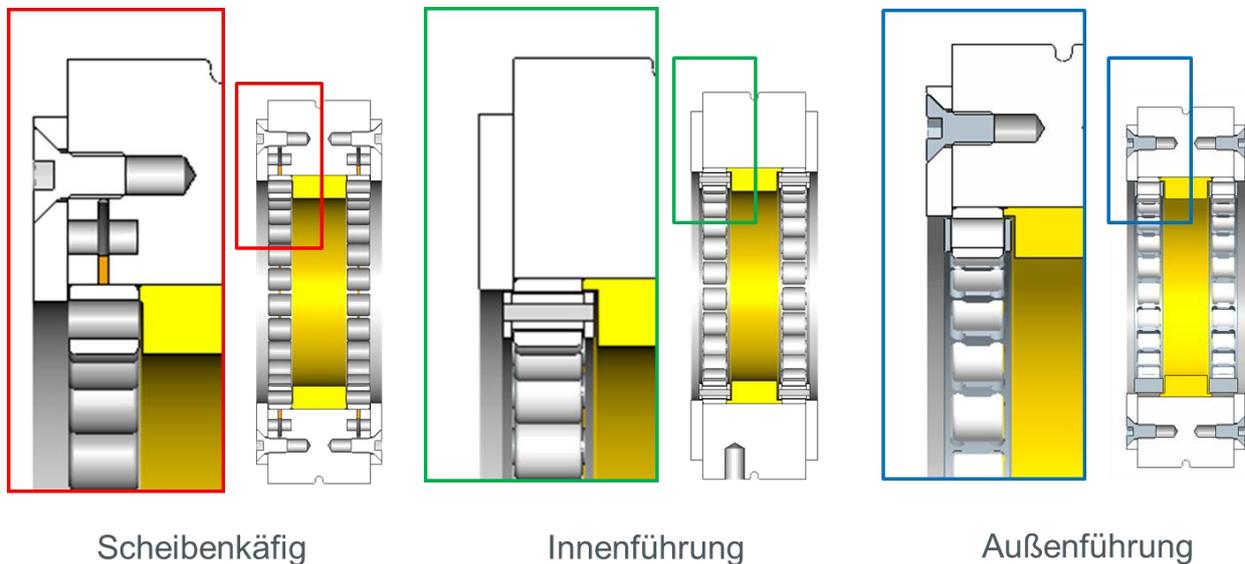


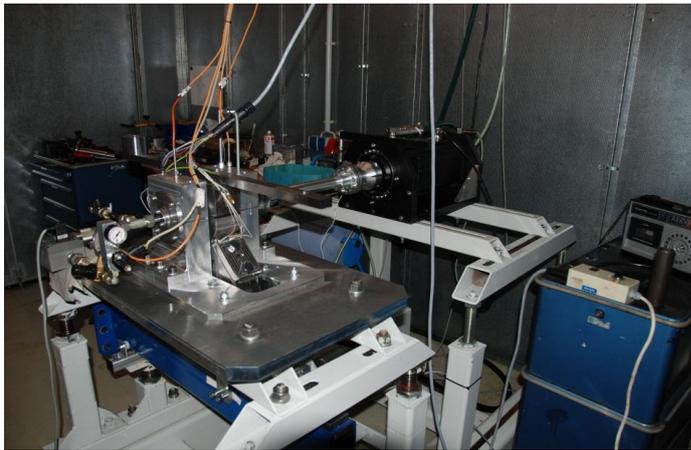
Bild 7: Vergleich der Käfigkonzepte

Im Anschluss wurden beide Käfigvarianten für die Erprobung auf dem Lagerprüfstand freigegeben.

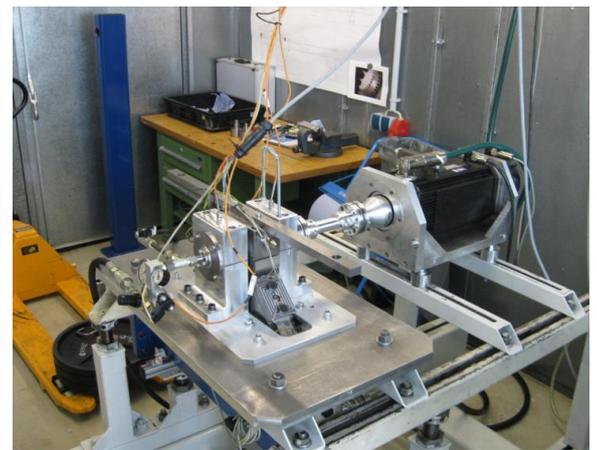
3.2 Messungen am Lagerprüfstand

Für die Erprobung, Vermessung und Bewertung wurde der im vorherigen Vorhaben entwickelte Lagerprüfstand eingesetzt. Um die Handhabung zu vereinfachen und die Reproduzierbarkeit der Messungen weiter zu verbessern, wurde der Prüfstand in geringem Maße überarbeitet. Dazu wurde ein neues Fundament gebaut, das die Montage von Elektromotor und Lagerbock auf der gleichen Ebene ermöglicht. Hierdurch vereinfacht sich die Ausrichtung zwischen Elektromotor und Prüflager, und im Betrieb vorhandene Vibrationen werden von Elektromotor und Prüflager gleichermaßen ausgeführt. Bild 8 zeigt den Lagerprüfstand und die Änderungen am Fundament.

Während der Inbetriebnahme des Lagerprüfstands zeigte sich eine nicht mehr ausreichende Koaxialität des Verbunds aus Grundwelle und Lagerstumpf. Hierdurch wurde der Lastarm des Prüfstands zu starken Schwingungen angeregt. Durch Rundheitsmessungen entsprechend Bild 9 konnte der Verschleiß der Lagerwelle bestätigt werden. Weiterhin zeigt Bild 9 den neu gefertigten Wellenverbund nach dem Härteprozess – vor dem Schleifen.



Vorher



Aktuell

Bild 8: Optimierung des Lagerprüfstands

Vermessung Wellenverbund



Ersatzwelle



Bild 9: Neufertigung Wellenverbund Lagerprüfstand

Nach dem Wiederaufbau des Lagerprüfstands wurden zunächst mit einer bekannten Lagerkonfiguration Referenzmessungen durchgeführt, um sicherzustellen, dass zwischen den alten und neuen Messungen ein direkter Vergleich zulässig ist. Das Diagramm in Bild 10 zeigt exemplarisch das gemessene Reibmoment in einem Drehzahlhochlauf einer bekannten Gleitlagerkonfiguration mit dem aktuellen Wellenverbund (blau) und dem neu aufgebauten Prüfstand im Vergleich zu einer vorherigen Messung (grün). Das Lager wurde hier mit 6,08 kN belastet. Die Ergebnisse zeigen, dass alte und neue Messergebnisse sehr gut übereinstimmen. Weiterhin ist ein deutlich ruhigerer Lagerlauf durch geringere Schwingungen auf dem Messsignal erkennbar. Damit konnte der Lagerprüfstand für das Vermessen der neuen Lagerkonfigurationen der adaptiven Lagerung freigegeben werden.

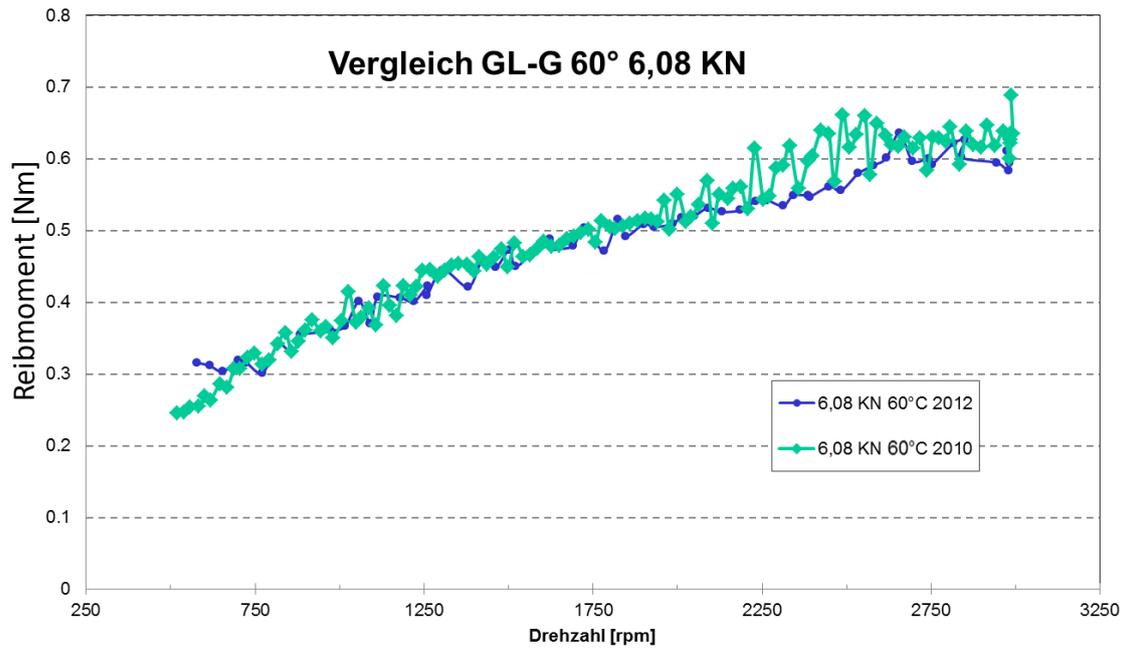


Bild 10: Referenzmessungen am Lagerprüfstand

Die beiden neuen Varianten der adaptiven Lagerung wurden auf dem Lagerprüfstand ausführlich über Last und Drehzahl vermessen. Dabei fiel zunächst der gegenüber der Variante mit Scheibenkäfig deutlich ruhigere Axiallauf auf. Zudem zeigte sowohl die Variante mit Rollen-Innenführung als auch die Variante mit Rollen-Außenführung ein gegenüber der Variante mit Scheibenkäfig weiter verringertes Reibniveau auf. Bild 11 zeigt exemplarisch gemessene Reibmomentwerte für einen Drehzahlhochlauf mit einer Lagerlast von 2700 N bei einer Öltemperatur von 90 °C. Erkennbar ist ein noch geringeres Reibleistungsniveau für die Käfigvariante mit der Rollen-Außenführung.

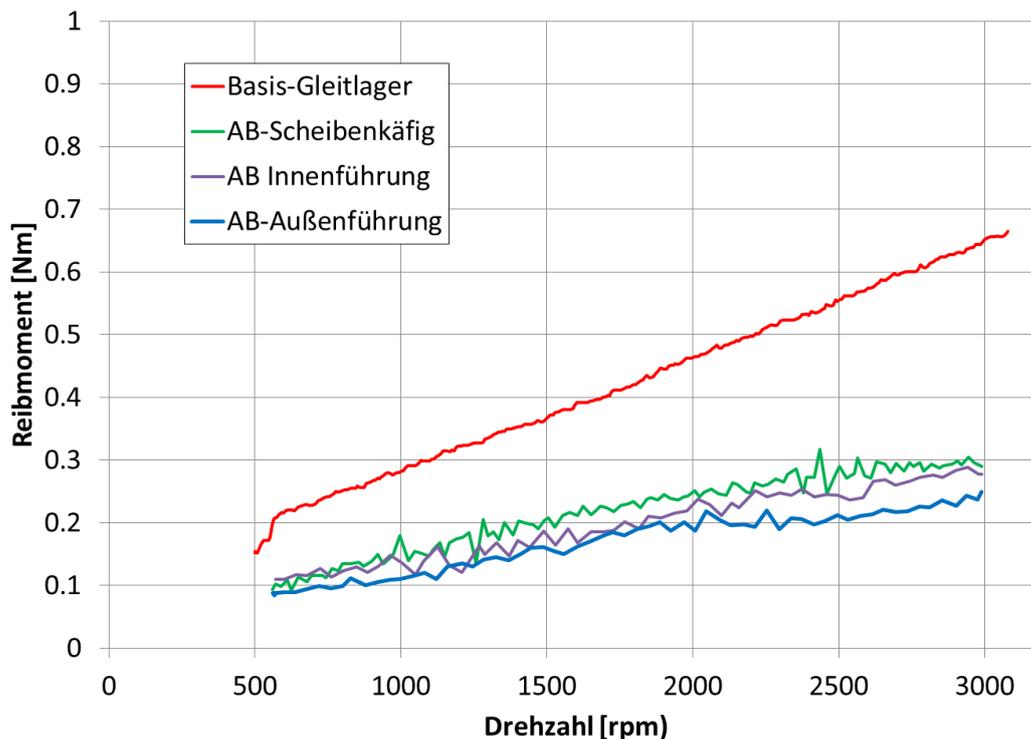


Bild 11: Reibmomentmessungen Lagerprüfstand

Die Messungen wurden mehrfach wiederholt, sodass auch der geringe Vorteil für die Variante mit Rollen-Außenführung als gesichert zu werten ist. Neben der Methode der Rollenführung ist davon auszugehen, dass wenigstens ein Teil des Reibungsvorteils von dem etwas schmaleren Gleitlager und dem um eine Rolle reduzierten Wälzlager rührt. Da der Reibungsvorteil im gesamten Messbereich zu quantifizieren war, kann davon ausgegangen werden, die günstigere Konfiguration der adaptiven Lagerung vorliegen zu haben. Weiterhin sind die Lagerkäfige für die Rollen-Außenführung fertigungstechnisch günstiger.

Bild 12 zeigt eine Gegenüberstellung der Reibleistungen bei 2700 N Lagerlast und den verschiedenen Öltemperaturen.

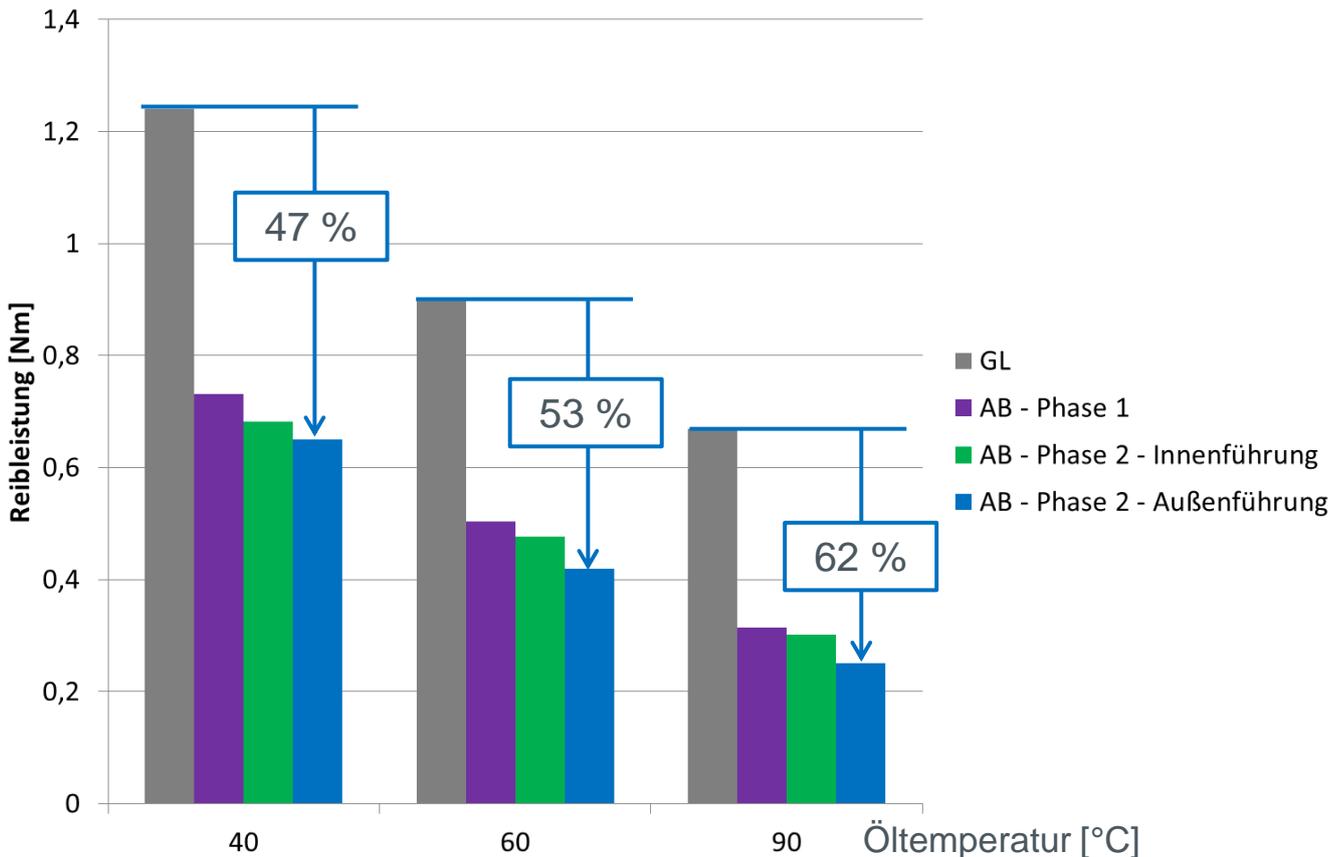


Bild 12: Vergleich Reibleistungsvorteil bei 2,7 kN

Erkennbar ist ein Reibleistungsvorteil der Variante mit Rollen-Außenführung bei allen Öltemperaturen. In jedem Fall kann die bisher erforderliche Nut für den Scheibenkäfig in der Rollenlaufbahn entfallen. Dies wirkt sich neben den fertigungstechnischen Vorteilen positiv auf die Haltbarkeit der Rollen aus. Alle Lagervarianten waren akustisch unauffällig. Aufgrund dessen wurde die adaptive Lagerung mit der Rollen-Außenführung für die Integration in den Vollmotor ausgewählt.

3.3 Konstruktive Motorintegration

Für die Tests und Messungen der adaptiven Lagerung sollte der bereits aus der ersten Programmphase vorhandene 2,0 l Opel Turbo Motor mit möglichst vielen bereits bestehenden Komponenten genutzt werden. Dazu gehören die für den

Prototypenbau extrem kostenintensiven Bauteile wie Kurbelwelle, Bedplate und Ölwanne.

Aufgrund dessen sollten die Komponenten der neuen adaptiven Lagerung möglichst in den bestehenden Bauraum integriert werden, jedoch ohne dabei zu große Kompromisse eingehen zu müssen. Zusätzlich war die Integration einer reibungsarmen Axiallagerung der Kurbelwelle erforderlich, um die durch die Wälzlagerung hervorgerufenen unvermeidlich höheren Axialkräfte der Kurbelwelle reibungsarm abfangen zu können.

Zunächst wurde das neue adaptive Lager in das Pleuel integriert. Dabei sollte die Konstruktion derart geändert werden, dass die zuvor während der Fertigung häufig aufgetretenen Schäden am Lagerbund, entsprechend Bild 13, sich nicht wiederholen.

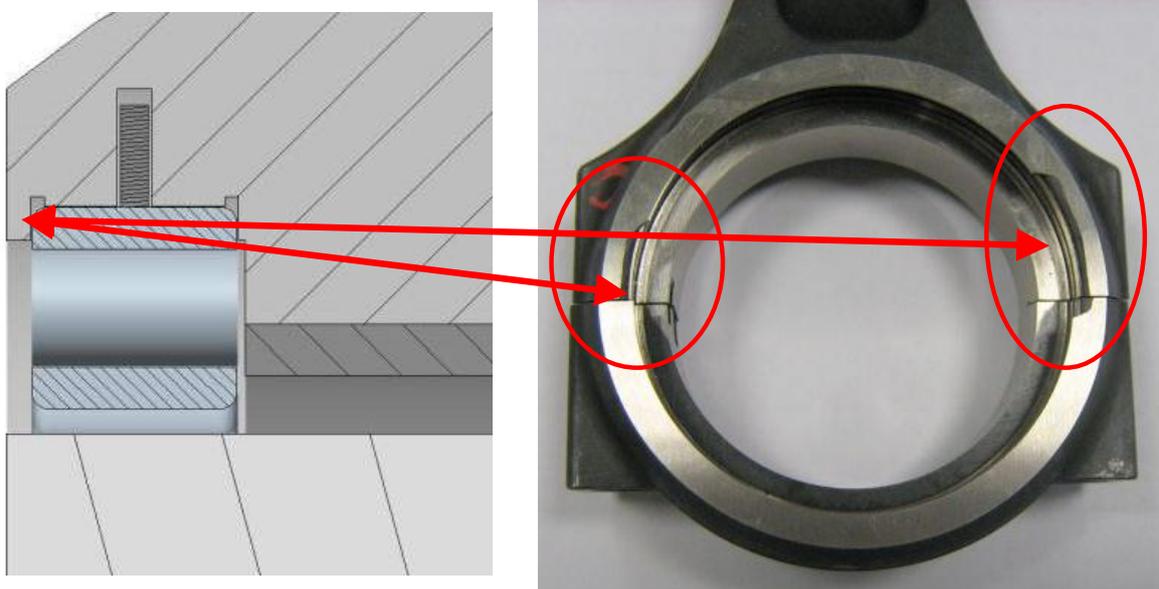


Bild 13: Fertigungsschäden an Pleuel

Des Weiteren sollte insbesondere der Schleifprozess vereinfacht werden, um nicht mehr mit der Schleifscheibe in den Hinterschnitt des Lagerbunds eintauchen zu müssen. All diese Anforderungen konnten erfolgreich durch die Konstruktion mit einem angeschraubten Seitendeckel gelöst werden. Durch die gebaute Konstruktion konnte ein ungehärteter Seitendeckel verwendet werden und die Anfälligkeit für Brüche vermieden werden. Weiterhin wäre ein Austausch des sehr einfach herzustellenden und kostengünstigen Seitendeckels nach einer Beschädigung möglich.

In Bild 14 ist ein Ausschnitt der Pleuelberechnung aus der vorherigen Programmphase zu sehen. Dabei sind eindeutig die hohen Flächenpressungen im Bereich der Nut des Scheibenkäfigs zu erkennen, die zwar nicht den Materialgrenzwert für Hertzsche Pressung überschreiten, aber dennoch im Bereich der Nutkante zu Ausbrüchen führen kann. Zudem ist leicht vorstellbar, dass ein Abrollen der Wälzkörper über eine solche Nut nicht ideal ist.

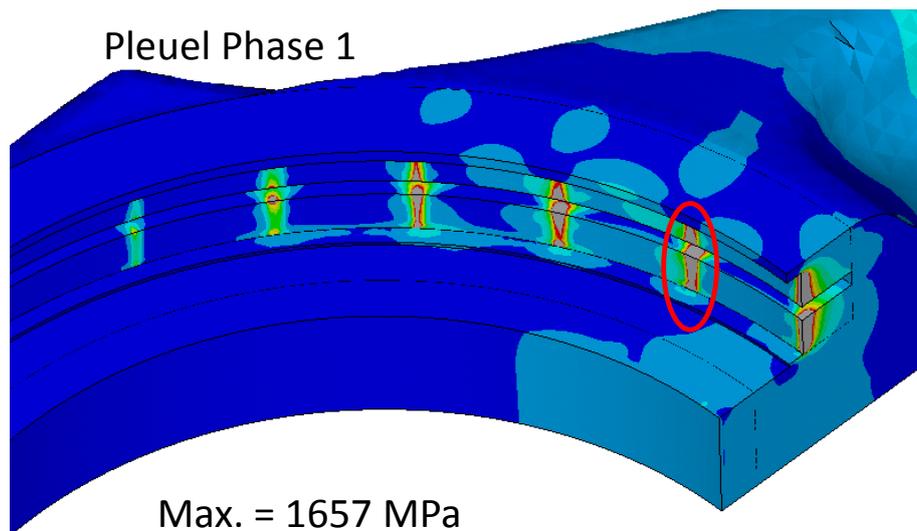


Bild 14: Belastungen Scheibenkäfig Nut in Pleuel – AB Phase 1

Durch das neue Käfigkonzept mit Rollen-Außenführung konnte dieser Bereich deutlich günstiger gestaltet werden. Bild 15 zeigt den Zusammenbau des Pleuels in der Explosionsdarstellung und einen Schnitt durch die Pleuelmitte. Der Schnitt zeigt sehr gut den Entfall der bisherigen Nut für den Scheibenkäfig. Hierdurch wird das Abrollverhalten der Wälzkörper positiv beeinflusst und die Gefahr des Ausbrechens von Material an den relativ hoch beanspruchten Kanten vermieden. Der axiale Bauraum des Pleuels konnte auf dem Maß der ersten Baustufe gehalten werden.

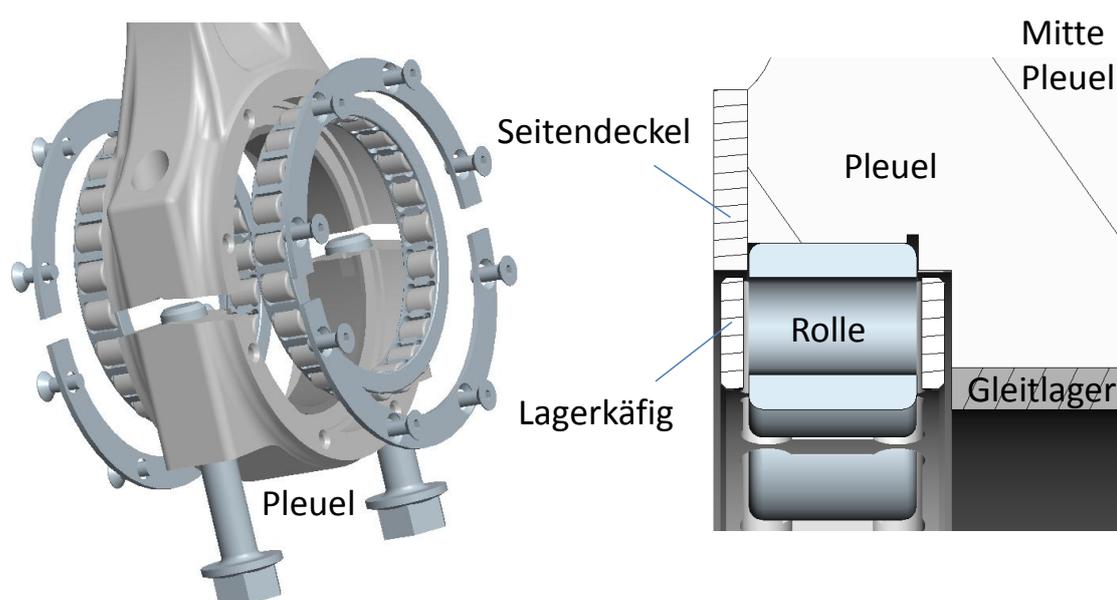


Bild 15: Aktuelles AB-Pleuel, Zusammenbau und Schnitt

Im folgenden Bild 16 ist das komplette Pleuel der aktuellen Baustufe als CAD-Modell zu sehen, wie es für den Einsatz im Vollmotor verwendet wurde.



Bild 16: Aktuelles Pleuel mit adaptiver Lagerung

Analog zum Pleuel wurde das Hauptlager mit der neuen adaptiven Lagerung mit Rollen-Außenführung konstruiert. Da bei der Hauptlagerung mit eingelegten Ringen in das Bedplate gearbeitet wurde, war hier vor allem die Neukonstruktion der Lagerringe erforderlich. Dabei wurde die zuvor in die Struktur integrierte Axialführung der Rolle ebenfalls durch eine angeschraubte Axialscheibe ersetzt. Es ergeben sich die bereits bei der Pleuellagerung erklärten Vorteile in gleicher Weise. Bild 17 zeigt den Zusammenbau des Hauptlagers und einen Schnitt durch die Unterseite des Lagerrings.

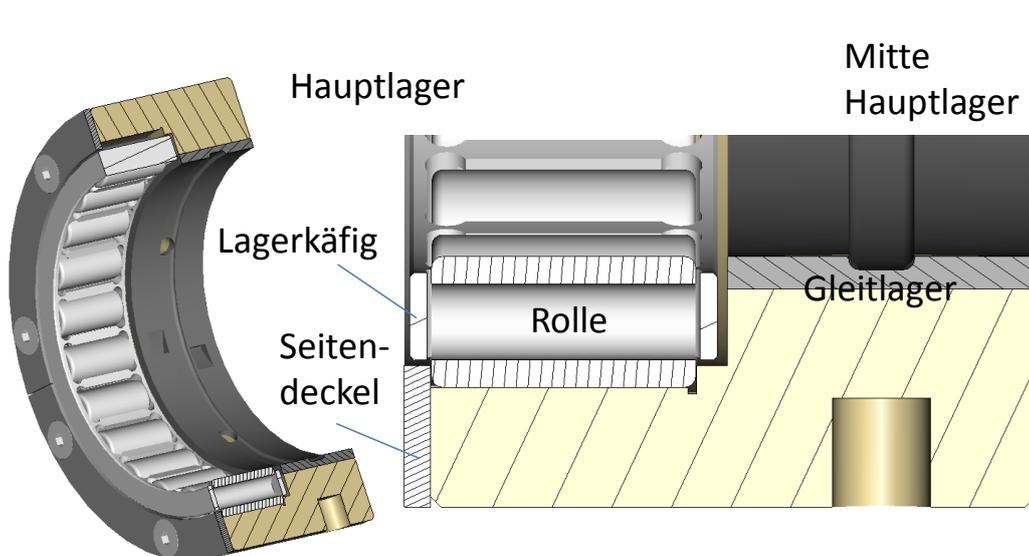


Bild 17: Aktuelles AB-Hauptlager, Zusammenbau und Schnitt

Der komplette Hauptlagerring mit adaptiver Lagerung als CAD-Modell, wie er für den Einsatz im Vollmotor verwendet wurde, ist in Bild 18 zu sehen. Die oben rechts erkennbare Bohrung auf der Außenseite des Lagerrings dient zur Anbringung eines Stahlstifts als Verdrehsicherung für den Lagerring im Bedplate.

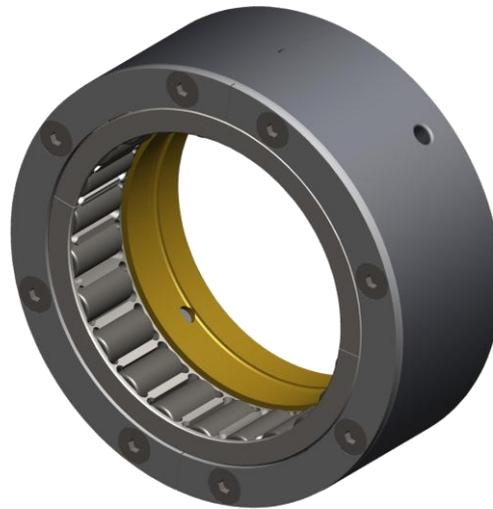


Bild 18: Aktueller Hauptlagerring mit adaptiver Lagerung

Die gesamte neue adaptive Lagerung konnte konstruktiv in den zuvor verwendeten Bauraum des Zielmotors integriert werden. Bild 19 zeigt einen Längsschnitt durch den gesamten Kurbeltrieb des Zielmotors mit der adaptiven Lagerung.

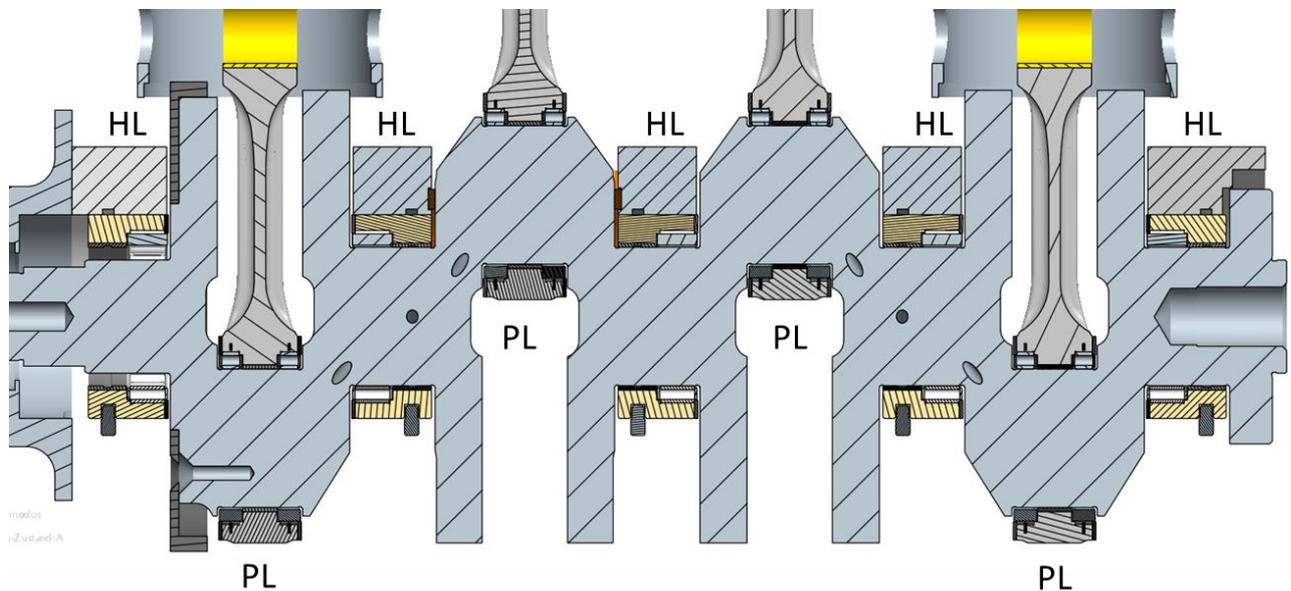


Bild 19: Längsschnitt durch Kurbeltrieb mit adaptiver Lagerung

Die Hauptlager werden über das Bedplate mit Drucköl versorgt und leiten gleichzeitig das Öl über die Kurbelwelle an die Pleuel weiter. Nach außen hin ist das Kurbelgehäuse, wie bei den meisten Motoren üblich, über Radialwellendichtringe abgedichtet.

Die nötigen Änderungen für ein wälzgelagertes Axiallager konnten innerhalb des bestehenden Bauraums nicht realisiert werden, da sie nicht von Beginn der Phase 1 an vorgesehen waren. Aufgrund dessen wurde die Axiallagerung am freien Ende der Kurbelwelle außerhalb des Kurbelgehäuses angebracht.

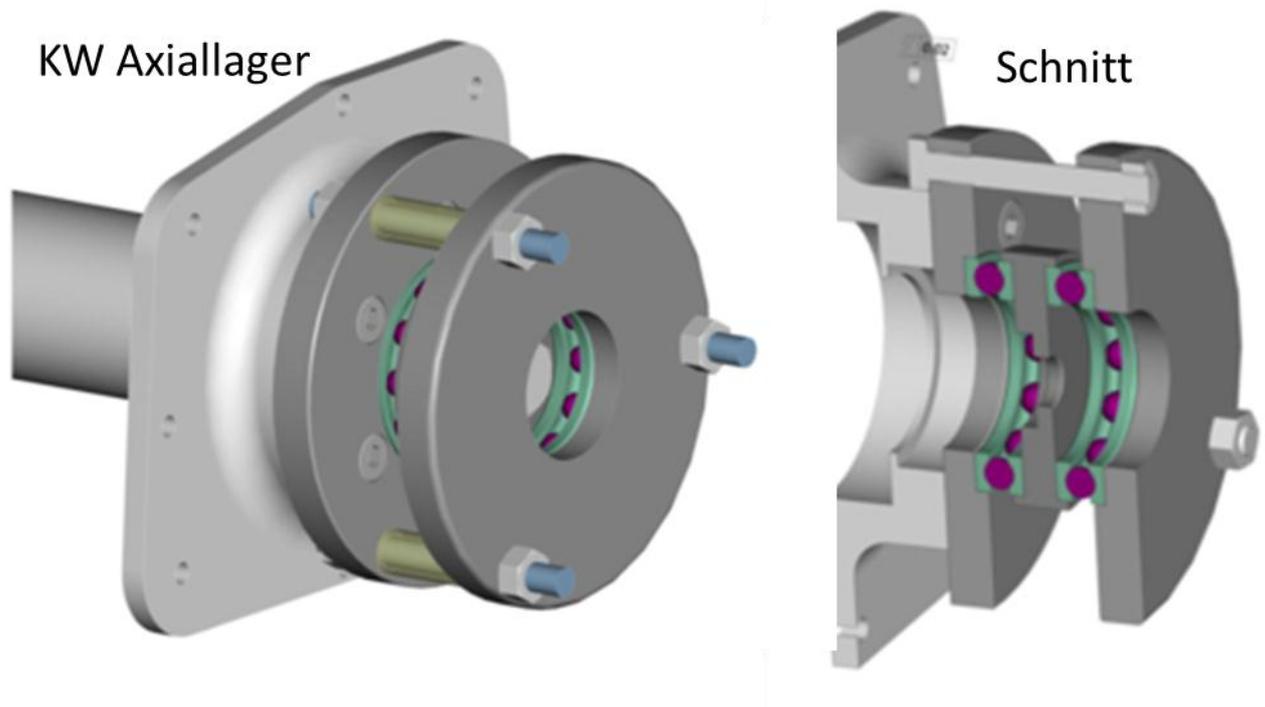


Bild 20: Kurbelwellen Axiallager

Bild 20 zeigt die Konstruktion des Axiallagers. Die Kurbelwelle ist über eine Zentralschraube mit der zwischen den beiden Axiallagern befindlichen Scheibe verbunden. Es sind zwei axiale Rillenkugellager erforderlich, da von diesem Lagertyp nur Druckbeanspruchungen abgefangen werden können. Durch die doppelte Anordnung kann der Axial Schub der Kurbelwelle in beide Bewegungsrichtungen wälzgelagert, und damit reibungsarm, abgefangen werden. Das erforderliche Axialspiel der Wälzlager wird über Distanzscheiben eingestellt, die in der erforderlichen Dicke zwischen die Verschraubungsbolzen gelegt werden.

Mit der Konstruktion der neuen Axiallagerung wurde die Konzept- und Konstruktionsphase erfolgreich abgeschlossen. Anschließend wurden von allen erforderlichen Komponenten Fertigungszeichnungen erstellt und an den entscheidenden Stellen wurden die Toleranzen und Spezifikationen der Oberflächenqualitäten definiert. Zur Dokumentation der Tests und Messungen am Motorprüfstand zeigt der folgende Abschnitt exemplarisch Bilder der gefertigten Bauteile.

3.4 Adaptiv gelagerter Motor am Schlepp-Prüfstand

Die bei der Konstruktion der adaptiven Lagerung vorgenommenen Optimierungen haben sich in der erwarteten Weise positiv auf den Fertigungsprozess ausgewirkt, sodass keine Bauteilschäden während der Fertigung und des Härteprozesses auftraten.

Bild 21 zeigt die für den Einsatz auf dem Mechanik- und Thermodynamik-Prüfstand gefertigte reibungsarme Axiallagerung der Kurbelwelle. Gekennzeichnet ist ferner die Stelle zum Justieren des Axialspiels mithilfe der Einstellscheiben.

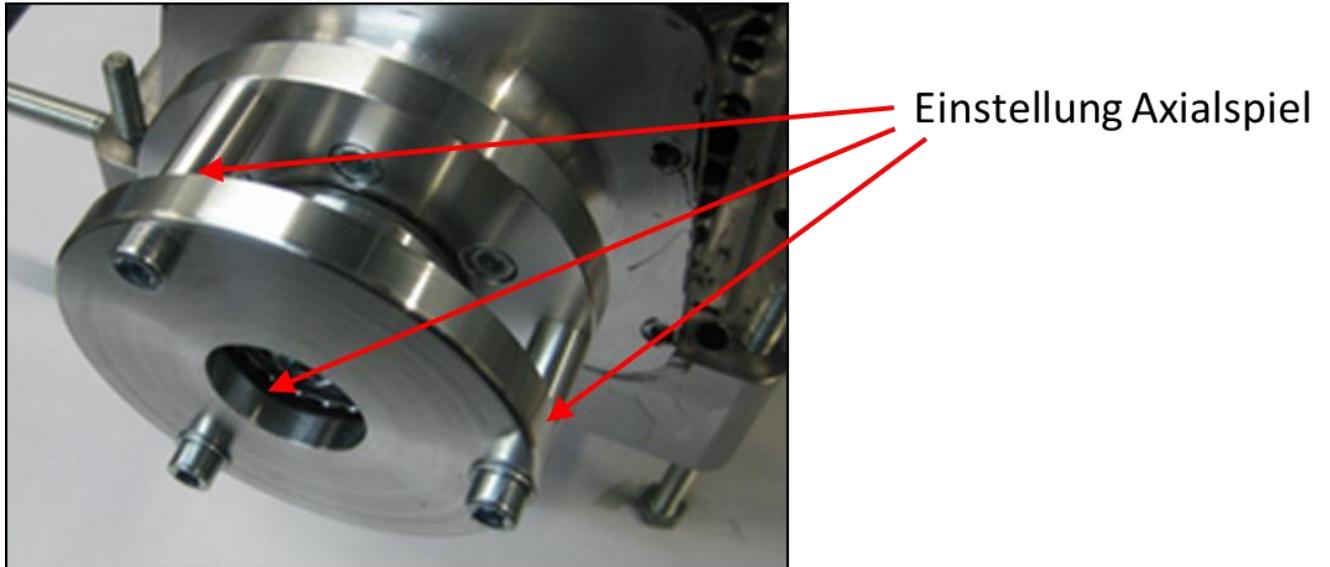


Bild 21: Gefertigte Axiallagerung

Im folgenden Bild 22 ist exemplarisch eines der gefertigten Pleuel mit der neuen adaptiven Lagerung zu sehen.



Bild 22: Pleuel mit neuer adaptiver Lagerung

Gleichermaßen wurden die Hauptlagerringe für den Einsatz der neuen adaptiven Lagerung am Vollmotor entsprechend Bild 23 gefertigt.



Bild 23: Hauptlagerring mit neuer adaptiver Lagerung

Die Wälzkörper wurden als Fertigteile bestellt und anschließend mit dem Erodier-Verfahren bearbeitet, um die entsprechenden Bohrungen einzubringen. Diese Methode hatte sich bereits nach der Erprobung verschiedenster Verfahren in der ersten Programmphase bewährt und wurde somit im aktuellen Vorhaben weiterverwendet.

Nach der Überarbeitung der aus der vorherigen Programmphase übernommenen Bauteile und der Neufertigung diverser Adapter sowie Klein- und Ersatzteile konnte die Montage des Triebwerks in ähnlicher Reihenfolge wie zuvor erfolgen:

- Kolben mit Pleueloberteil in Block einbauen
- Pleueloberschale mit Wälzkörpern, Käfighälfte und Gleitlagerschale bestücken
- Oberschale der Hauptlager in Block einlegen
- Hauptlageroberschale mit Wälzkörpern, Käfighälfte und Gleitlagerschale bestücken
- Kurbelwelle einlegen
- Haupt- und Pleuellager mit Käfigen und Rollen bestücken
- Haupt- und Pleuellagerdeckel mitsamt Gleitlagerschalen auflegen
- Pleueldeckel verschrauben
- Bedplate auflegen
- Hauptlager verschrauben
- Bedplate am Block verschrauben
- Externes Axiallager montieren
- Axialspiel der Kurbelwelle mit Scheiben einstellen
- Ölwanne montieren

Zusätzlich zu der üblichen Messtechnik für Verbrennungsmotoren wurden die Hauptlagerstellen mit Temperatursensoren ausgestattet, die ein frühzeitiges Erkennen von Fehlfunktionen am Lager ermöglichen.

Das folgende Bild 24 zeigt den Aufbau des adaptiv gelagerten Triebwerks auf dem Mechanik-Prüfstand. Erkennbar ist neben dem eigentlichen Kurbelgehäuse die Brille zur Einleitung der erforderlichen Schraubenkräfte. Dies ist erforderlich, um die Kolbenlaufbuchsen in den richtigen Deformationszustand zu bringen, der sich nach der Montage des originalen Zylinderkopfes einstellt. Weiterhin wurde eine Haube auf das Kurbelgehäuse aufgebracht, die verhindert, dass Ölnebel durch Blow-By in den Prüfstand gelangt. Die Ölversorgung des Motors erfolgte mit einer externen Konditionierung, um die für die Untersuchungen erforderlichen Öltemperaturen einstellen zu können. Die Öldrücke wurden entsprechend der ursprünglichen Messungen am Originaltriebwerk eingestellt.

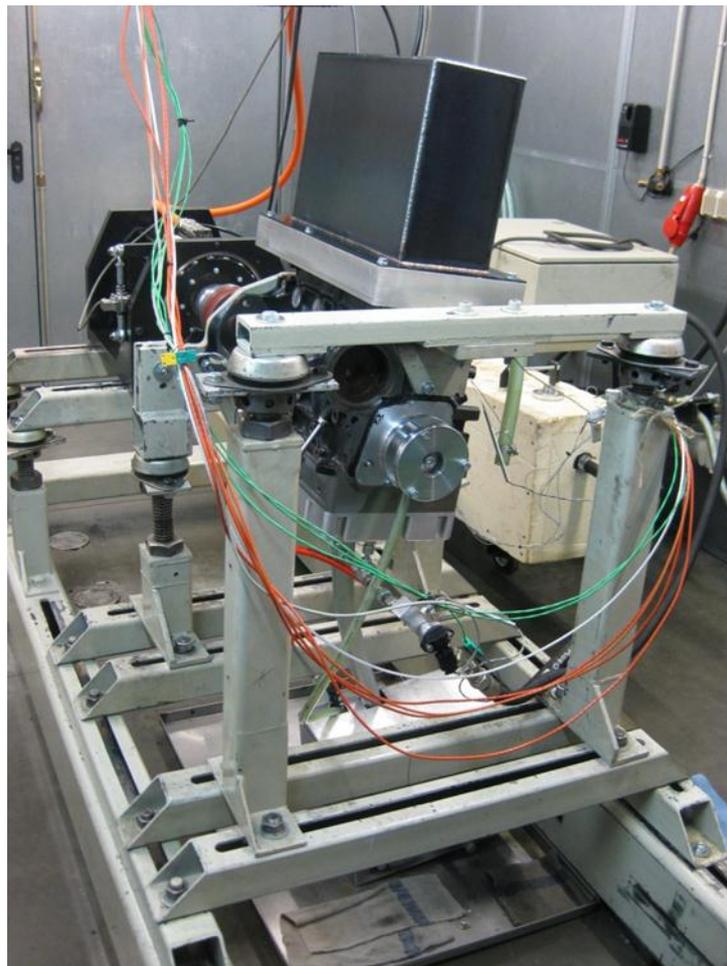


Bild 24: Adaptiv gelagerter Vollmotor auf Mechanik-Prüfstand (Schlepp-Prüfstand)

Nach der Montage erfolgte die manuelle Funktionskontrolle, die einen leicht und gleichmäßig drehenden Kurbeltrieb ohne Rastpunkte oder Ähnliches aufzeigte. Daraufhin wurde das gesamte Triebwerk einer Einlaufprozedur unterzogen, damit sich die in Kontakt befindlichen Reibpartner aufeinander einstellen können. Dies geschah bei niedriger Motordrehzahl, um auf mögliche Fehlfunktionen rechtzeitig reagieren zu können. Nach dem unauffälligen und problemlosen Einlaufprogramm wurden die eigentlichen Reibmessungen bei Öltemperaturen von 30 °C, 50 °C und 90 °C durchgeführt.

Das folgende Bild 25 zeigt die Ergebnisse der Schleppmomentmessungen des Vollmotors mit adaptiver Lagerung im Vergleich zu der vorherigen Baustufe der ersten Programmphase und dem Basismotor bei den verschiedenen Öltemperaturen.

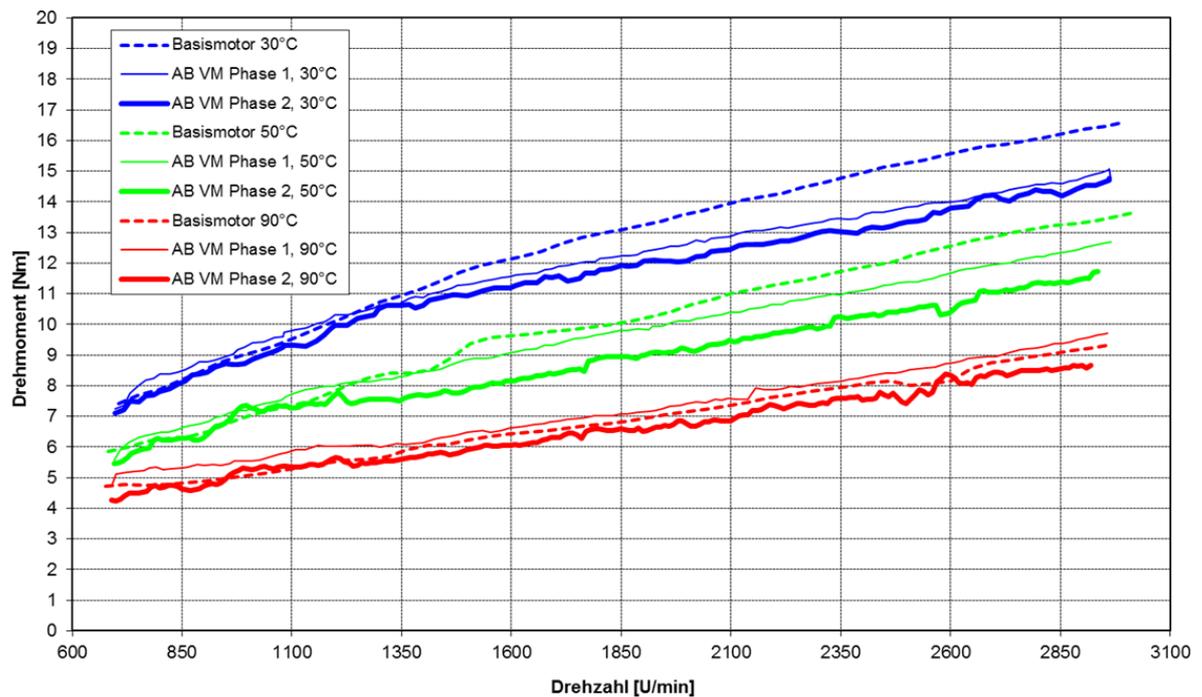


Bild 25: Schlepplmessungen des adaptiv gelagerten Motors

Zu erkennen ist eine Verringerung des Reibmomentes der aktuellen adaptiven Lagerung, sowohl gegenüber der vorherigen Baustufe als auch gegenüber dem Basismotor. Bei niedrigen und mittleren Öltemperaturen ist der Vorteil gegenüber der Basis mit etwas über 10 % am größten. Im Bereich der hohen Öltemperatur von 90 °C verkleinert sich der Vorteil auf nur noch 5 %. Gegenüber der vorherigen Baustufe der adaptiven Lagerung, die bei hohen Öltemperaturen sogar einen Reibungsnachteil auswies, stellt dies einen deutlichen Fortschritt dar. Insgesamt befindet sich das Niveau der Reibungsreduzierung jedoch noch nicht in der erwarteten Größenordnung. Es ist anzumerken, dass bei den Reibungsmessungen am Mechanik-Prüfstand die Kolbengruppe im Schleppmoment enthalten ist.

Die Aufteilung zwischen Kolbengruppe und Kurbeltriebslagerung ist in etwa hälftig, sodass der Reibungsvorteil der Gleitlagerung in etwa doppelt so hoch ist wie zuvor ausgewiesen. Mit dann etwa 10 % ist der Vorteil bei hoher Öltemperatur in der Reibungsreduzierung nur etwa ein Sechstel so groß wie erwartet. Bei niedriger und mittlerer Öltemperatur ist der Vorteil von 20 % etwas weniger als halb so groß wie erwartet.

Da das Grundverhalten sich in ähnlicher Weise, wie bereits in der ersten Baustufe, wiederfindet, geht die Vermutung dahin, dass ähnliche Effekte in abgemilderter Form vorliegen könnten. Der positive Effekt durch die verbesserte Rollenführung und die reibungsarme Axiallagerung konnte jedoch eindeutig belegt werden. Auf akustischer Seite waren während des gesamten Betriebs keine Auffälligkeiten zu verzeichnen. Für eine weitere Analyse der gesamten Bewertungsparameter unter realen Betriebsbedingungen wurde der Grundmotor an den Thermodynamik-Prüfstand übergeben.

3.5 Adaptiv gelagerter Motor am Thermodynamik-Prüfstand:

Für die Tests und Messungen der neuen adaptiven Lagerung am gefeuerten Thermodynamik-Prüfstand wurde dieser mit der erforderlichen Messtechnik und einer Ölkonditionierung für die externe Versorgung des Motors mit entsprechend konditioniertem Öl hinsichtlich Druck und Temperatur ausgestattet. Die durch die externe Ölversorgung gemessene geringere Reibung wurde im Nachhinein mithilfe des zuvor in der ersten Programmphase gemessenen Ölpumpenkennfelds eingerechnet. Der Öldruck im Motorbetrieb wurde dabei entsprechend der zuvor am Basismotor in der Hauptgalerie gemessenen Drücke eingestellt. Eine spätere eventuelle Reduzierung des Öldrucks aufgrund eines geringeren Ölbedarfs der Lager ist in den Messungen nicht berücksichtigt, da dieser erst belegt werden müsste.

Nach dem Aufbau des Motors, entsprechend Bild 26, wurde zunächst die Motorsteuerung mit der erforderlichen Sensorik und den entsprechenden Aktuatoren in Betrieb genommen.



KW Axiallager

Bild 26: Adaptiv gelagerter Motor am Thermodynamik-Prüfstand

Nach den Messungen des adaptiv gelagerten Motors am Schlepp-Prüfstand, die nicht das zuvor am Lagerprüfstand gemessene Reibminderungspotenzial wiedergaben, waren die Erwartungen an das Potenzial zur Reibminderung am Thermodynamik-Prüfstand etwas verhalten. Da jedoch die Anregungen der Kurbelwelle durch Gas- und Massenkräfte im gefeuerten Betrieb viel höher sind, ließ sich vermuten, dass sich die verbesserte Axialführung deutlicher bemerkbar mache.

Für einen repräsentativen Vergleich mit den Ergebnissen aus der ersten Programmphase wurden äquivalent die folgenden Messpunkte ausgewählt:

- 750 min^{-1} , Leerlauf
- 1000 min^{-1} , 2 bar p_{me}
- 1000 min^{-1} , 1 bar p_{me} , 2 bar p_{me} , 8 bar p_{me}

Die Öl- und Wassertemperaturen wurden mit der Medienkonditionierung in den einzelnen Messpunkten jeweils auf 25 °C, 50 °C und 90 °C eingestellt. Um zufällige Messfehler zu vermeiden, wurden die Messungen mehrfach wiederholt. Als Hauptbewertungsparameter diente der in Bild 27 dargestellte spezifische Kraftstoffverbrauch. Das Auftragen als prozentuale Veränderung erlaubt einen direkten Vergleich zum Basismotor.

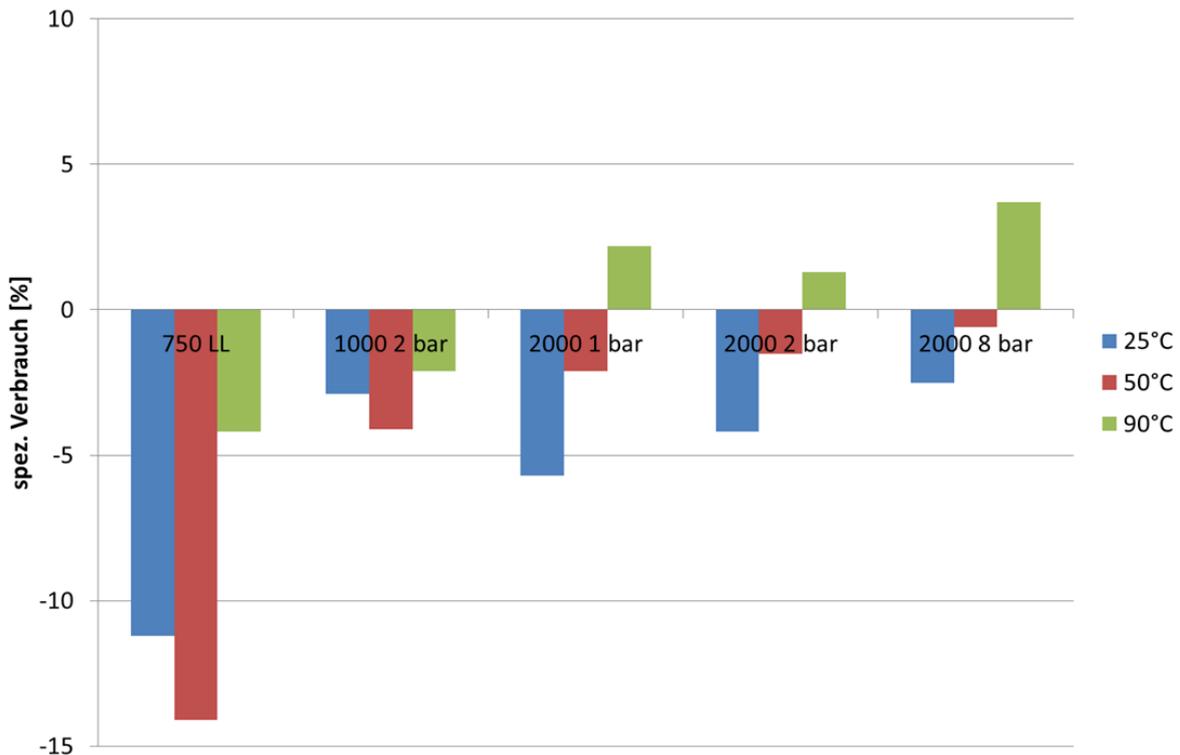


Bild 27: Prozentuale Änderung des Kraftstoffverbrauchs durch adaptive Lagerung

Äquivalent zu den Messungen am mechanischen Schlepp-Prüfstand konnte die Tendenz eines abnehmenden Reibungsvorteils hin zu steigenden Temperaturen festgestellt werden, der zu 90 °C hin sogar in einen Reibungsnachteil umschlug. Überdies ist der Einfluss der Last zu erkennen, der hin zu höheren Belastungen zu einer höheren Reibung führt. Dies kann über einen vermehrten Eingriff des Gleitlagers im Betrieb mit höheren Gasdrücken begründet werden. Im Leerlauf und bis in den Bereich geringerer Drehzahlen konnte ein deutlicher Reibungsvorteil quantifiziert werden. Für eine positive Bilanz im Neuen Europäischen Fahrzyklus ist dies jedoch nicht ausreichend.

Insgesamt fanden sich bei der weiterentwickelten adaptiven Lagerung die gleichen Tendenzen wie in der ersten Programmphase wieder, jedoch auf verbessertem Niveau. Zum Vergleich zeigt Bild 28 noch mal die Ergebnisse der ersten Programmphase vom Thermodynamikprüfstand.

Nach den in den Referenzpunkten erfolgten Messungen wurde der Motor bis hin zu 4000 Umdrehungen pro Minute und Lasten bis 15 bar betrieben. Dies entspricht etwa 240 Nm. Für eine weitere Aussage der Dauerhaltbarkeit unter realen Betriebsbedingungen wurde der Motor für etwa 50 Stunden im genannten Bereich

betrieben. Im gesamten Zeitraum wurden keine Auffälligkeiten verzeichnet. Auch der Referenzpunkt bei 2000 Umdrehungen pro Minute und 2 bar Last zeigte zum Ende des Programms keine Auffälligkeiten. Dies kann als weiterer Entwicklungsschritt der Lagertechnik gewertet werden.

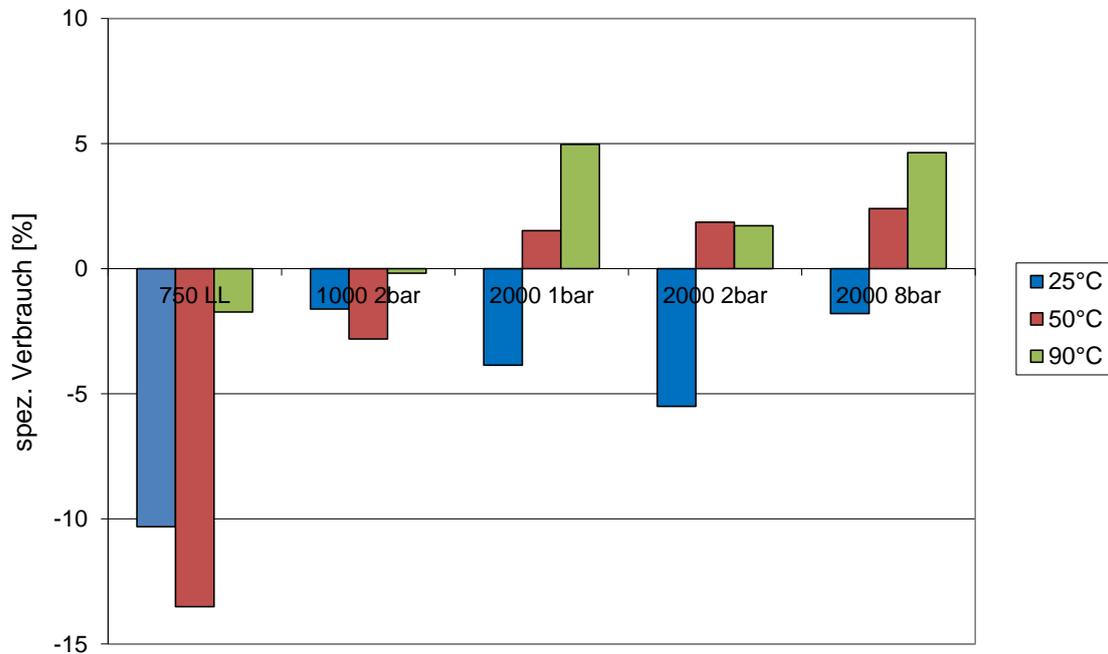


Bild 28: Prozentuale Änderung Kraftstoffverbrauch AB-Lagerung aus Phase 1

Im akustischen Bereich war der Motor in allen Betriebspunkten unauffällig. An dieser Stelle wurde das Untersuchungsprogramm der adaptiven Lagerung am Thermodynamik-Prüfstand beendet.

4. Fazit

Die aus der ersten Programmphase hervorgegangenen Optimierungsschritte wurden im aktuellen Vorhaben konsequent umgesetzt. Das weiterentwickelte adaptive Lager weist über den die Rollen umschließenden Käfig eine deutlich bessere Rollenführung auf, die sich bereits in einem sehr ruhigen Lauf auf dem Lagerprüfstand wiederfand. Der Entfall der Scheibenkäfignut in der Laufbahn der Wälzkörper konnte neben einer vereinfachten Fertigung positiv zur Haltbarkeit der Lagerung beitragen.

Als größter Schritt hinsichtlich der Vereinfachung der Fertigung ist die axiale Führung der Wälzkörper über einen angeschraubten Deckel sowohl bei den Pleuel- als auch bei den Hauptlagern zu sehen. Die Ausschussquote in der Fertigung der Pleuel und der Hauptlagerringe konnte hierdurch auf null gebracht werden. Zeit und Kosten für den Schleifprozess wurden deutlich reduziert. Auch die zuvor gleitgelagerte Axiallagerung wurde in eine reibungsarme Wälzlagerung überführt. Da der bestehende Bauraum eine Integration in das Pleuelgehäuse nicht mehr ermöglichte, wurde diese am freien Ende der Pleuelwelle, außen am Pleuelgehäuse, angebracht. Zukünftig müsste diese in das Pleuelgehäuse integriert werden, was, wenn gleich zu Konstruktionsbeginn berücksichtigt, machbar ist.

Hinsichtlich der Reibungsreduzierung konnte die neue adaptive Lagerung die Erwartungen nur zum Teil erfüllen. Die anfänglich positiven Ergebnisse des Lagerprüfstands hinsichtlich Laufruhe und Reibniveau fanden sich in nur stark reduzierter Weise am Schlepp-Prüfstand wieder. Gleichermäßen gilt dies für die Messungen am Thermodynamik-Prüfstand. Eine letztlich gesicherte Erklärung hierfür gibt es zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht. Die wesentlichen Unterschiede zum Lagerprüfstand bestehen im Lastprofil und der Mehrfachlagerung der Pleuelwelle. Hier könnten unvermeidliche Axial- und Biegeschwingungen der Pleuelwelle zu einem Verspannen der Lager und damit zu einer Erhöhung der Reibung führen. Diese Punkte müssen im Rahmen einer Weiterentwicklung in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner erörtert werden.

Der aktuelle Stand der Entwicklung der adaptiven Lagerung stellt eine solide Basis dar, um einen Industriepartner zu gewinnen. Aufgrund der noch nicht ausreichenden Potenziale muss die Zusammenarbeit zunächst noch im Bereich der Entwicklung angesiedelt werden. Für eine Serienentwicklung im Bereich der Anwendung im Pleueltrieb von Verbrennungsmotoren ist das Potenzial noch nicht groß genug. Des Weiteren muss zusammen mit einem Industriepartner über Anwendungsfälle über die extrem anspruchsvolle Lagerung eines Pleueltriebs hinaus nachgedacht werden. Für einfachere Anwendungen könnte die adaptive Lagerung mit dem jetzigen Entwicklungsstand in der Summe ihrer Eigenschaften bereits ausreichende Vorteile aufweisen.

5. Veröffentlichungen

27.11.2008

Hochschulvortrag an der Universität in Gyöer, (Audi-Ungarn)

Adaptive Lagerung – Ein Konzept zur Reduktion der Reibleistung von Verbrennungsmotoren

09.06.2009:

Fachvortrag VDI Tagung für Gleit- und Wälzlagerung in Wiesloch

Adaptive Lagerung – Ein Konzept zur Reduktion der Reibleistung von Verbrennungsmotoren

26.11.2009

Hochschulvortrag an der Universität in Gyöer, (Audi-Ungarn)

Adaptive Lagerung – Ein Konzept zur Reduktion der Reibleistung von Verbrennungsmotoren: Fortschritte in der Entwicklung

16.12.2010

Hochschulvortrag an der Universität in Gyöer, (Audi-Ungarn)

Adaptive Lagerung – Ein Konzept zur Reduktion der Reibleistung von Verbrennungsmotoren: praktische Erfahrungen

Zusätzlich wurden verschiedene Automobilhersteller und Zulieferer angesprochen und das System über Messeauftritte beworben.

Internationales CTi Symposium Berlin: 2010

Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik: 2008, 2009, 2010, 2011, 2012

Internationales Wiener Motorensymposium: 2008, 2009, 2010, 2011, 2012