

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
WANKEL ROTARY	20L9701A
Vorhabensbezeichnung:	
Untersuchung der Tauglichkeit des WANKEL-Kerosin-Kreiskolbenmotors für den Einsatz in der allgemeinen Luftfahrt Erstellung von drei 2-Läufer-Motoren und Leistungsnachweis auf dem Motorprüfstand (Experimentalprogramm)	
Laufzeit des Vorhabens:	
01.07.97 – 30.06.99	
Berichtsart:	
Abschlußbericht	

Dezember 1999

Autoren:

Dr.-Ing. R. Klotz

Dipl.-Ing. D. Eiermann

Dipl.-Ing. S. Kolossow

0. Gliederung

1. Aufgabenstellung
2. Voraussetzungen
3. Planung und Ablauf des Vorhabens
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen
6. Erzieltes Ergebnis
7. Nutzen und Verwertbarkeit
8. Fortschritt bei anderen Stellen
9. Veröffentlichungen

Vorbemerkung

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen 20L9701A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren.

1. Aufgabenstellung

Im Rahmen des Vorhabens sollte die Tauglichkeit des Diesel/Kerosin verbrennenden Wankel-Kreiskolbenmotors für den Einsatz in der allgemeinen Luftfahrt untersucht werden; hierzu wurden drei Funktionsmustermotoren mit je zwei Läufern (Rotoren) erstellt, um die Leistungsfähigkeit des Konzepts in allen wesentlichen Punkten am Prüfstand demonstrieren zu können.

Bei den durchgeführten Arbeiten handelte es sich darum, ein bereits bei WANKEL existierendes Grundkonzept, das seine Funktionsfähigkeit in zahlreichen nicht luftfahrtorientierten Anwendungen nachgewiesen hat, in einzelnen Komponenten hinsichtlich der Erfüllbarkeit spezifischer Anforderungen der Luftfahrt zu untersuchen. Der Umfang beschränkte sich dabei auf die wesentlichen Punkte, um in einem überschaubaren Rahmen zu bleiben. Die erforderlichen weiteren Schritte sind der späteren Gesamtentwicklung zuzuordnen. Hierzu gehört auch die Durchführung eines Flugversuchsprogramms, welches aus den genannten Gründen nicht vorgesehen war.

Die Funktionsmuster sollten das Potential eines Wankel-Flugmotors für Jet-A-Kraftstoff aufzeigen und dessen besondere Vorteile, nämlich:

- klein, leicht
- vibrationsarm
- kerosinfähig
- geringer Verbrauch
- zuverlässig, betriebssicher
- hohe Standzeit, wartungsarm
- kostengünstig
- schadstoffarm
- Flughöhenkompensation durch Turboaufladung

Hierzu waren Komponenten-Entwicklung, Anpassung von Bauteilen, Einbeziehung neuerer Verfahren/Technologien in die Konstruktion und vielfältige Optimierungsarbeiten erforderlich.

Thematisch sollten mit den Arbeiten verschiedene Fragestellungen geklärt werden:

Nach der Festlegung der bereits ansatzweise vorhandenen Spezifikation war die Konstruktion unter Verwendung des verfügbaren Standes (LOC-R-Diesel-Saugmotor) zu entwerfen und entsprechend den spezifischen Einsatzbedingungen zu überprüfen, insbesondere hinsichtlich Kühlung, Schmierung, Lagerung, Dichtung und Integration weiterer Komponenten. Aufgrund der angestrebten Leistungen (ca. 55...75 kW pro Motor) war auf eine Koppelbarkeit (Doppelmotoren-Anordnung/„Twinpack“) zu achten, um für spätere Flugversuche den Anwendungsbereich nicht zu sehr einzuschränken. - Die Doppelmotor-Einheit liefert mit 110...150 kW (150...200 PS) ausreichend Leistung und bietet darüberhinaus den Vorteil erhöhter Sicherheit (eingeschränkte aber aufrechterhaltene Funktionsfähigkeit bei Ausfall nur eines Motors).

Parallel zur Konstruktion sollten die zusätzlich erforderlichen bzw. anzupassenden/zumodifizierenden Komponenten ausgewählt werden; hierzu zählen Hochdruck-Einspritzsystem, Zündsystem, Abgassystem, Aufladesystem, Kühlsystem und sonstige Peripherie.

Von theoretischer Seite war auf Basis der definierten Anforderungen zu untersuchen, ob Sonderwerkstoffe verwendet werden können. Dementsprechend war eine Vorauswahl zu treffen.

Ziel aller Untersuchungen war es, den Einfluß der das System bestimmenden Parameter zu ermitteln. Da das Betriebsverhalten hauptsächlich aus dem Verbrennungsablauf resultiert, stellt diese Thematik den zentralen Bereich dar. Dabei hierbei nicht einfach Ergebnisse aus dem Bereich der Hubkolbenmotoren-Technik übertragbar sind, waren experimentelle Untersuchungen notwendig, insbesondere zu

- Ladungsschichtung und Aufladegrad
- Verbrennungsparameter wie Brennraumgeometrie, Einspritzdüsen, Einspritzstrategie und Entflammung
- Auswirkungen auf Zuverlässigkeit/Dauerfestigkeit.

2. Voraussetzungen

Die WANKEL ROTARY GmbH, ist als die Firma anzusehen, die in direkter Folge die von Felix Wankel begonnenen Arbeiten auf dem Gebiet der Drehkolben-Maschinen in Deutschland zentral weiterführt.

Im Laufe der letzten 25 Jahre nach Ende der ersten großen Wankel-Motoren- und Antriebserfolge, also seit ca. 1975, wurden in aller Stille und unter Leitung des Großkonzerns Lonrho PLC/GB weitere wichtige Motorenentwicklungen vorangetrieben und neue Patente und sonstige industrielle Schutzrechte in der Wankel-Gruppe erarbeitet. Dabei wurden auch umfangreiche Forschungsarbeiten für die Verwendung von Jet-A-Kraftstoffen und Diesel durchgeführt.

Seit 1. Oktober 1992 sind die gesamten Wankel-Aktivitäten wieder zu 100% in deutschen Händen, und es wurden weitere, neue Patente angemeldet und Entwicklungen durchgeführt.

Zur Zeit werden kleine und leichte Wankel-Flugmotoren im Leistungsbereich zwischen 26 kW und 52 kW für den Bereich der Ultralight- und Experimentalflugzeuge in Serie gefertigt, vertrieben und in Service betreut.

Neben dieser Baureihe LCR (gemischgekühlter Läufer) mit einem Kammervolumen 407 ccm wurden und werden in geringer Stückzahl Prototypen der Baureihe LOCR (ölgekühlter Läufer) mit gleich großem Kammervolumen hergestellt und in zahlreichen Anwendungen erprobt. Die Adaption an die Applikation steht in diesen Fällen meist im Vordergrund, um die spezifischen Vorteile nutzen zu können, z.B. direkte Integration von Generatorläufern auf der Exzenterwelle des Motors bei leichten Stromerzeuger-Einheiten. Im Laufe dieser Arbeiten wurde der Konstruktionsstand schrittweise vervollständigt.

Besondere Aufmerksamkeit wurde dabei der Ausführung mit Hochdruck-Direkteinspritzung zuteil, die in der Lage ist, Dieselmotorkraftstoff zu verbrennen; der Motor ist mit einer einfachen handelsüblichen Steckpumpe ausgerüstet und mit Fremdzündung versehen. Ursprünglich wurde der Antrieb für den Einsatz in kleinen mobilen Strom/Energieversorgungs-Einheiten entwickelt (s.a.

Literaturliste in Kap. 4); für den militärischen Bereich hat dieser Motor den anspruchsvollen NATO-400h-Dauerlauftest bereits 1993 im Prototypenstadium erfolgreich absolviert. Die Vielstofffähigkeit wurde bis hin zu Gemischen aus rohem Rapsöl und Diesel ebenfalls nachgewiesen.

Die Anforderungen in diesen Anwendungen sind jedoch niedriger als für das hier vorgesehene Ziel, da im wesentlichen die Erfordernisse eines Betriebs mit einer konstanten Drehzahl bei wechselnder Last zu erfüllen sind, während im Flugbetrieb mit unterschiedlichen Drehzahlen bei Lasten auf meist hohem Niveau gefahren wird. Aus diesem Grund ist eine Integration eines Motors auf Basis des ursprünglichen Standes ohne Anpassungen nicht möglich.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Bevor mit einer Muster-Entwicklung eines Flugmotors begonnen werden kann, ist in sinnvollen Zwischenschritten die Tauglichkeit in praktischen Tests (Experimentalprogramm) zu untersuchen, wobei der hier durchgeführte Arbeitsumfang sich darauf beschränkte, Funktionsmuster zu erstellen und Prüfstandsuntersuchungen vorzunehmen, um in einer folgenden Phase die Basis für Flugversuche zu schaffen. Um die Kosten in einem überschaubaren Rahmen zu halten, wurde dabei soweit wie möglich auf eine bereits vorhandene Konstruktion der konzipierten Baureihe LOCR zurückgegriffen.

Die Hauptarbeitspunkte(AP) im Rahmen des Vorhabens waren wie folgt geplant:

- AP 1 Festlegung der Zielspezifikation
- AP 2 Funktionsmuster-Entwurf
- AP 3 Auswahl der Motorperipherie
- AP 4 Aufbau der Funktionsmuster
- AP 5 Betriebsverhaltensuntersuchungen
- AP 6 Dauerlauf-Untersuchungen
- AP 7 Begleitende Arbeiten

AP 1 Festlegung der Zielspezifikation

Zu Beginn des Vorhabens war die vorläufig erstellte Zielspezifikation im einzelnen zu detaillieren: Definition aller Schnittstellen - mechanisch, elektrisch, ... -, Vorgaben für Bauraum und Gewicht, Festlegung der Systemkonfiguration (Zusatzaggregate, Peripherie, Einhebelbedienung, ...), und die

Zielvorgaben für das Betriebsverhalten (Leistung, Verbrauch, dynamisches Verhalten, Verschleißverhalten).

AP 2 Funktionsmuster-Entwurf

Zuerst war eine Analyse der vorhandenen Konstruktion der bereits konzipierten Baureihe LOCR hinsichtlich der im AP 1 festgelegten Spezifikation durchzuführen. Neben rein konfigurativen Details (Integration zusätzlich erforderlicher Aggregate, Koppelbarkeit zu mehrmotorigen Einheiten, etc.) gehört dazu die Berücksichtigung der erhöhten Bauteilbeanspruchung. Aus diesem Grund wurden vorab Festigkeitsanalysen unter Beachtung der besonderen thermischen Gegebenheiten im Betrieb mit Hilfe von Finite-Element-Methoden angestellt und die betreffenden Bauteile zu optimieren (externe FE-Leistung); insbesondere betraf die Gehäuseteile und Läufer im Zusammenspiel mit deren Kühlung. Desweiteren gehörten dazu die Oberflächenbeschichtungen, da diese das Verschleißverhalten (höhere spezifische Motorleistung = höherer tribologische Belastung) und damit die Dauerstandfestigkeit beeinflussen. Es war deshalb zu prüfen, ob existierende Werkstoffe/Beschichtungen neu eingestellt sein müssen, bzw. neuere Werkstoffe einzusetzen sind.

Auf der Basis der dabei gewonnenen Erkenntnisse war die vorhandene Konstruktion zu überarbeiten, d.h. Neuteile zu entwerfen, wo notwendig, ansonsten - insbesondere bei den komplexeren Bauteilen - nur die erforderlichen Modifikationen durchzuführen.

AP 3 Auswahl der Motorperipherie

Unter diesem Arbeitspunkt ist sowohl die Auswahl der zum Betrieb und zur Bedienung erforderlichen externen Peripherie, als auch die Auswahl aller Motoranbauteile zu verstehen, die als Untersysteme von extern zuzuliefern waren. Neben den Komponenten zur Motor- und Ladeluftkühlung sowie der Leistungselektrik (Generator/Starter), die entsprechend der höheren

Leistung zu wählen waren, bildeten die Untersysteme zur Motoraufladung (Abgasturbolader) und zur Verbrennungssteuerung (Hochdruck-Einspritzung zur Ladungsschichtung und Fremdzündung) die Hauptschwerpunkte dieses Arbeitspaketes.

Hier sollte soweit möglich auf am Markt verfügbare Systeme zurückgegriffen werden; diese waren aber an die spezifischen Forderungen des WANKEL-Antriebs zu adaptieren, was in Form einer Anpaßentwicklung ablaufen sollte. Hierzu war ursprünglich die Zuarbeit durch die Systementwickler/lieferanten geplant. Wie sich im Laufe des Vorhabens herausstellte, mußten diese jedoch weitgehend von WANKEL selbst durchgeführt werden.

AP 4 Aufbau der Funktionsmuster

Dieser Punkt umfaßt die Teilebeschaffung und -fertigung. Insbesondere die Fertigung der komplexeren Bauteile erforderte eine aufmerksame Vorgehensweise, z.B. bei den zu ändernden Gußteilen (Motorgehäuse , d.h. Modellerstellung/änderung). Da der Großteil der Teile durch externe Fertigung erstellt werden mußte, bedeutete dies in einigen Fällen von interner Seite eine intensive Betreuung (Fertigungsbegleitung und -überwachung). Wie sich zeigte, war dies auch erforderlich, da mehrfach fehlerhafte Ausführungen geliefert wurden, welche eine Hauptursache für aufgetretene Verzögerungen darstellte.

Erst nach Vereinnahmung und Qualitätsfreigabe aller Teile konnte mit dem eigentlichen Funktionsmustersaufbau begonnen werden. Aufgrund der aufgetretenen Abweichungen von der ursprünglichen Planung wurden insgesamt drei Sätze an Teilen beschafft, aber nur ein Mustersaufbau vorgenommen. Dieser wurde im April 1999 auf der AERO in Friedrichshafen präsentiert. Die zwei übrigen Sätze stehen für eine Komplettierung bei Fortführung eines Anschlußvorhabens (Flugversuchsprogramm) zur Verfügung.

AP 5 Betriebsverhaltensuntersuchungen

Nach Vorbereitung des Motorprüfstandes wurden Voruntersuchungen, soweit möglich, bereits vor der Fertigstellung des ersten Funktionsmuster-Motors begonnen, und zwar mit der konzipierten LOCR-Konstruktion und unter Verwendung von vorhandenen Musterteilen durchgeführt.

Der wesentliche Inhalt dieses Arbeitspunktes war die systematische Untersuchung des Betriebsverhaltens im allgemeinen und der zentralen Einflußgröße für den Verbrennungsablauf, der Gemischaufbereitung, im besonderen. Neben den geometrischen Vorgaben (Muldenform, Einspritzort, Strahlwinkel, etc.) spielt die Einspritzstrategie (zeitlicher Ablauf) eine entscheidende Rolle. Daneben sind aber auch die selbstverständlich einzuhaltenden dynamischen Bedingungen der Einspritzhydraulik zu beachten.

Die Untersuchungen wurden mit einem Basismotor ohne Aufladung begonnen und nach Ermittlung der grundsätzlichen Abstimmung mit dem aufgeladenen System fortgeführt. Neben den Leistungswerten und dem dynamischen Verhalten sollte auch die Schadstoffemission und der Kraftstoffeinfluß (Kerosin/Jet-A) untersucht werden.

AP 6 Dauerlauf-Untersuchungen

Im Rahmen eines Dauerlaufes sollten Untersuchungen hinsichtlich der Dauerstandfestigkeit durchgeführt werden. Hierzu gehören auch allgemeine Verschleißuntersuchungen (insbesondere Dichtungen). Für den Nachweis der Zuverlässigkeit - als Voraussetzung für eine spätere Flugerprobung - empfahl sich hierzu ein 150h-Zyklustest anlehnend an die für die allgemeine Luftfahrt geltenden Vorschriften (JAR-E bzw. FAR Part 33). Die ursprüngliche Planung, dies mit dem endgültigen Musteraufbau eines Funktionsmusters durchzuführen, konnte aus Gründen von Terminverschiebungen nicht mehr innerhalb des Vorhabenszeitraumes umgesetzt werden.

Die erkennbaren aber nicht mehr kompensierbaren Verschiebungen führten deshalb zur Strategie, Praxisversuche zum Bauteilverhalten in Versuchsmotoren exemplarisch zu absolvieren. Für die über FEM optimierten Bauteile ergab sich dabei ein nur noch minimaler konstruktiver Korrekturbedarf.

AP 7 Begleitende Arbeiten

Vorhaben begleitend sind alle Arbeiten zu sehen, die allgemein zur ordnungsgemäßen Durchführung des Vorhabens erforderlich sind wie Projektleitung/steuerung, Qualitätssicherung, Dokumentation/Berichtserstellung, etc.

Ursprünglich war das Vorhaben für eine Laufzeit von 18 Monaten geplant. Im Laufe der Durchführung zeigte es sich aber, daß sowohl im Ablauf als auch in der Gesamtdauer eine Anpassung an die gegenüber der Planung geänderten Voraussetzungen erfolgen mußte. Aufgrund nicht eingehaltener Zusagen bei den vorgesehenen externen Entwicklungsleistungen von Lieferanten, welche dann selbst soweit möglich durchgeführt wurden (insbesondere Turboaufladung, Einspritzung), sowie Verzögerungen und Qualitätsmängel in der Teilezulieferung durch externe Fertiger/Lieferanten wurde das Vorhaben um 6 auf 24 Monate verlängert. Gleichzeitig wurden die wesentlichen Untersuchungen nicht mit den endgültigen Funktionsmustern, sondern mit besonderen Testaufbauten („Vorläufer“) vorgenommen, um im Rahmen der verlängerten Laufzeit das Vorhabenziel inhaltlich erfüllen zu können.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Entsprechend der Zielsetzung im Hinblick auf gewünschte Leistungsdaten, vor allem aber auf den Anwendungsbereich allgemeine Luftfahrt, stellt sich die Frage nach dem Stand der Wankel-Technik. Leider ist der allgemeine Kenntnisstand – auch bei vielen Fachleuten - zumeist auf dem Niveau der Wankel-Entwicklung von 1965-70 stehengeblieben; dies ist eine direkte Folge der untergeordneten Bedeutung dieses Motortyps im Automobilbereich und der daraus folgenden mangelnden Aufmerksamkeit gegenüber den spezifischen Veröffentlichungen.

Die Firma Mazda/Japan ist der einzige Hersteller, der die Fertigung des Kreiskolbenmotors in Großserie weiterverfolgt hat und im Laufe der Jahre über 2 Millionen Stück produziert hat. Mittlerweile werden auch in Deutschland wieder Wankel-Motoren in wachsender Stückzahl produziert, und zwar von der WANKEL ROTARY GmbH für den Bereich der Ultraleicht-Flugzeuge und für Industrieanwendungen (Diesel verbrennend !).

In der direkten Gegenüberstellung zum allgemein verwendeten Hubkolbenmotor heutiger Bauart liegt der Kreiskolbenmotor auf vergleichbarem Niveau, eben nachgewiesen bei dem genannten Serienmotor von Mazda. Die im Zuge der Entwicklung des Wankel-Motors - und ehemals nur dort - angewandten und optimierten Technologien sind in der Zwischenzeit auch in die Serienfertigung der Hubkolbenmotoren übernommen worden (z.B. Nicasil-Schichten etc.) und dort millionenfach im täglichen Einsatz.

Die erforderliche Technik für den Bau moderner Kreiskolbenmotoren ist also vorhanden, wobei zwischen dem mechanischen Aufbau des Motors einerseits und der Steuerung des Verbrennungsablaufs andererseits unterschieden werden muß. Neu ist also die Kombination der verschiedenen Technologien mit dem Ziel eines optimalen Systemverhaltens.

Für das hochgesteckte Ziel eines Flugmotors mit extremer Zuverlässigkeit, günstigem Leistungsgewicht, geringem Verbrauch bei gleichzeitiger Kraftstoffunempfindlichkeit und geringer Umweltbelastung durch Lärm- und Abgasemission muß nur die zur Verfügung stehende Technik

sehr sorgfältig auf ihre Eignung untersucht werden oder gegebenenfalls auf neue Techniken ausgewichen werden. Neue Techniken sind hier zu verstehen als vorhandene und bewährte Technologien, welche bisher im Bereich der Flugmotoren noch nicht eingesetzt werden (z.B. keramische Bauteile, Hochdruck-Direkteinspritzung, Erzeugung einer geschichteten Ladung vor der Verbrennung, etc.).

Die zu Beginn der KKM-Entwicklung zeitweilig aufgetretenen Probleme mit den Dichtleisten konnten durch einfache konstruktive Maßnahmen behoben werden. Mit üblichen Kolbenring-Gußwerkstoffen werden Standzeiten erreicht, die über denen sonstiger Verschleißteile liegen. Durch Einsatz von Sonderwerkstoffen (Keramik) kann der Verschleiß fast auf null reduziert werden. Die Zuverlässigkeit sowohl bei Hochleistung als auch unter den Bedingungen der Großserienfertigung ist hinreichend nachgewiesen (MAZDA).

Im Vergleich zum HKM ist der Aufbau des KKM wesentlich einfacher. Durch die Modularität können viele Gleichteile in einer Baureihe verwendet werden, die vom Einläufer bis zum Vierläufer reicht und damit ein weites Leistungsspektrum abdeckt. Dies stellt von der Kostenseite einen großen Vorteil für eine Serienfertigung dar und spricht für die KKM-Technologie.

Entwicklungen in USA

Exklusiver Lizenznehmer der früheren gemeinsamen Lizenzgeber NSU-Wankel GmbH war ursprünglich die Firma Curtiss-Wright Corp. und zwar für Motoren hoher Leistung bis über 1000 kW. Schon in den 60er Jahren begann Curtiss-Wright mit den ersten Versuchen für den Betrieb mit unterschiedlichen Kraftstoffen (heavy fuel) im Auftrag der US-Marine mit dem Ziel, einen laufruhigen kompakten Motor mit bestem Leistungsgewicht zu erhalten. Diese Entwicklungen wurden später von der Firma John Deere in US-Regierungsprogrammen weitergeführt und wurden dann bei der Firma Rotary Power International Inc. (RPI) zusammengefaßt in drei verschiedenen Prototyp-Motorbaureihen, nämlich den Serien 70, 170 und 580 entsprechend jeweils einem

Einzelkammervolumen von 700 ccm, 1700 ccm und 5800 ccm. RPI war bis Sept. 1996 Lizenznehmer von WANKEL ROTARY.

Bei den Prototypen der Serie 580 wurden bisher ca. 15000 Stunden akkumuliert in Prüfstandsläufen und Versuchseinbauten. Das vorgesehene Anwendungsgebiet umfaßt Bootsantriebe, Generatorantriebe und APUs sowie Antriebe für gepanzerte Fahrzeuge. Praktische Einbauten wurden vorgenommen in Landungsbooten des US Marine Corps sowie in Amphibienfahrzeugen und in gepanzerten Kettenfahrzeugen, um Felderfahrungen zu sammeln. Es wurde der Betrieb mit verschiedenen Kraftstoffen nachgewiesen (JP-4, JP-5, JP-8, unterschiedliche Dieselqualitäten und Benzin) und ein spezifischer Verbrauch unter 230 g/kWh erreicht.

Die bei RPI ausschließlich durch US-Militär- bzw. NASA-Aufträge finanzierten Motorenentwicklungen arbeiten mit Hochdruck-Einspritzung, wobei zwei unterschiedliche Düsen pro Läufergehäuse verwendet werden (Pilot- und Hauptdüse), und einer zusätzlichen Fremdzündung. Dadurch wird bei der Verbrennung ein Schichtlade-Effekt erzielt und der Nachteil der unvollständigen Verbrennung, der typisch wäre für eine homogene Gemischaufbereitung vor dem Motor - üblicherweise bei Ottomotoren verwendet -, vermieden. Daraus stammt auch die amerikanische Bezeichnung SCORE = Stratified Charge Omnivarious Rotary Engine. Alle Ausführungen besitzen Abgasturboaufladung mit einem Standard-Ladedruckverhältnis von 2:1.

Literatur

Pischinger, R., et. al.:

Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine; Springer-Verlag.

Yamamoto, K., et al.:

Combustion Characteristics on Rotary Engines; 1971.

Yamamoto, K.:

Rotary Engine; Tokyo, 1972.

Bensing, W.-D.:

Rotationskolben-Verbrennungsmotoren; Springer-Verlag, 1973.

Dietrich, J.:

Bestimmung der örtlichen Wärmeübergangszahl vom Brenngas zur Wand eines Wankel-Motors; Karlsruhe, 1979.

Jones, C.:

An Update of applicable automotive Engine - Rotary Stratified Charge Developments; SAE, Technical Paper Series, Nr. 820347, 1982.

Kraemer, O., Jungbluth, G.:

Bau und Berechnung von Verbrennungsmotoren; Springer-Verlag, 1983.

Jones, C.:

A New Source of Lightweight, Compact Multifuel Power for Vehicular, Light Aircraft and Auxiliary Applications - The John Deere Score Engines; ASME, 88-GT-271, 1988.

Mount, R.E., LaBouff, G.A.:

Advanced Stratified Charge Rotary Engine Design; SAE, Technical Paper Series, Nr. 890324, 1989.

Kita, T., et al. - Mazda Motor Corp.:

Noise and Vibration Reduction Technology for Rotary Engine; SAE, Technical Paper Series, Nr. 890325, 1989.

Badgley, P.R., et al.:

Analysis and Test of Insulated Components for Rotary Engine; SAE, Technical Paper Series, Nr. 890326, 1989.

Watanabe, S., Hamai, Y. - Mazda Motor Corp.:

Investigation of Cyclic Combustion Variation in Rotary Engine; SAE, Technical Paper Series, Nr. 890327, 1989.

Lee, C.M., et al.:

Strain Measurements in a Rotary Engine Housing; SAE, Technical Paper Series, Nr. 890333, 1989.

Abraham, J., Bracco, F.V.:

Fuel-Air Mixing and Distribution in a Direct-Injection Stratified-Charge Rotary Engine; SAE, Technical Paper Series, Nr. 890329, 1989.

Abraham, J., Bracco, F.V.:

Comparison of Computed and Measured Pressure in a premixed Charge Natural Gas fueled Rotary Engine; SAE, Technical Paper Series, Nr. 890671, 1989.

Eiermann, D., Nuber, R., Breuer, J. - Wankel R&D GmbH Soimar, M., Gheorgiu, W. - RPI Inc.:

An Experimental Approach for the Development of a Small Spark Assisted Diesel Fueled Rotary Engine; SAE, Technical Paper Series, Nr. 030683, 1993.

Meyer, A.E., Shoemaker, C.R.:

High Speed Electronic Fuel Injection for Direct Injected Rotary Engine; SAE, Technical Paper Series, Nr. 950452, 1995.

Shimizu, R., et al. - Mazda Motor Corp.:

The Characteristics of Fuel Consumption and Exhaust Emissions of the Side Exhaust Port Rotary Engine; SAE, Technical Paper Series, Nr. 950454, 1995.

ALROUND e.V. - Arbeitsgruppe Flugantrieb für Flugzeuge der Allgemeinen Luftfahrt:

Voruntersuchung Flugantrieb - Abschlußbericht der vom BMBF geförderten Studie; April 1996.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen der theoretischen Behandlung von zunächst reinen Strömungsvorgängen, später evtl. Verbrennungsvorgängen im Kreiskolbenmotor wurde mit folgenden wissenschaftlichen Stellen die Bereitschaft zur Zusammenarbeit erklärt und hierzu auch vorhandene Ergebnisse bisheriger Untersuchungen zur Verfügung gestellt:

- Institut für angewandte Mathematik (Prof. Rannacher), Universität Heidelberg, Forschungsvorhaben,
- Lehrstuhl für numerische Mathematik (Prof. Bader), BTU Cottbus.

Bis zum Zeitpunkt dieses Berichtes liegen allerdings WANKEL ROTARY von dort noch keine Ergebnisse vor.

6. Erzieltes Ergebnis

6.1 Festlegung der Zielspezifikation (AP 1)

6.1.1 Betriebsverhalten

Es wurde ein Betriebsverhalten angestrebt, bei dem die Leistung in einem weiten Bereich nahezu konstant bleibt bei einer vom Meeresspiegel ansteigenden Druckhöhe. Für die spätere Anwendung bedeutet dies eine weitgehende Unabhängigkeit des Startgewichts von der Höhe des Platzes.

Im Folgenden wird die zu erwartende Leistungscharakteristik überschlägig berechnet und weitere Vorgaben festgelegt.

Motordaten

Nennleistung:	70 kW (95 PS) sind angestrebt
Nenndrehzahl:	6000 1/min Motordrehzahl ist angestrebt
spez. Verbrauch:	< 300 g/kWh bei Vollast
Motorgewicht:	50 kg sind angestrebt
Systemgewicht:	85 kg sind angestrebt

Leistungsverlust $f(T)$; $f(H)$:

Im Rahmen der Konzeptdefinition wurde der Leistungsverlust als Funktion der Temperatur und der Höhe abgeschätzt. Der tatsächliche Leistungsverlust kann erst nach endgültigen Versuchen mit der Abgasturboaufladung berechnet werden. Für das nachfolgend angegebene Diagramm wurden Annahmen getroffen, die im Versuch mit der ausgewählten Abgasturboaufladung weiter zu bestätigen / nachzuweisen sind.

- Abnahme der Lufttemperatur, -druck und -dichte mit der Flughöhe nach ICAO-Standard
- spezifische isobare Wärmekapazität der Luft: 1005 J/Kg K
- Isentropenexponent der Luft: 1,4
- Motor-Verdichtungsverhältnis: 10,5
- Drehzahl: 6000 1/min
- konstante Luftzahl: 1,5
- Liefergrad: 110 %
- Gütegrad des vollkommenen Motors: 0,8
- mechanischer Wirkungsgrad: von Druckhöhe 0 bis 10 Km
von 0,74 auf 0,77 linear steigend
- Gegendruck der Abgasanlage: 100 mbar
- Kraftstoffheizwert: 42,6 MJ/Kg
- Mindestluftbedarf zur vollständigen Verbrennung: 14,5 Kg Luft/Kg Kraftst.
- Regelung ATL-Waste-gate: Verdichterdruckverhältnis steigt linear von 1,6 in einer Druckhöhe von 0 km auf 2,2 in einer Druckhöhe von 3,5 km an. Bei Druckhöhen über 3,5 km bleibt das Verdichterdruckverhältnis bei der vorgesehenen ATL-Auslegung konstant.
- isentroper Verdichterwirkungsgrad: 0,75
- isentroper Turbinenwirkungsgrad: 0,7
- mechanischer Wirkungsgrad des Abgasturboladers: 0,95

- Abgastemperatur vor der Turbine in Druckhöhe 0m: 750°C
- spezifische isobare Wärmekapazität des Abgases: 1150 J/kg K
- Isentropenexponent des stöchiometrischen Abgases: 1,33
- Druckverlust im Ladeluftkühler: 40 mbar
- Temperaturreduktion im Ladeluftkühler bei ICAO Standardbedingungen im Vollastbetriebspunkt nach folgender empirischer Formel: $\Delta T = ({}^{85}/_2 \cdot \pi_v - {}^{85}/_2)$

Die Außentemperatur hat keinen Einfluß auf die Leistung des konzipierten Triebwerks. Erst wenn die Außentemperatur über die spezifizierte Temperatur von 49°C steigt, kann die Abgasturboaufladung den Füllungsverlust aufgrund der zu geringen Ladeluftkühlung nicht mehr ausreichend kompensieren.

Der Einfluß der Flughöhe auf die Triebwerksleistung ist im folgenden Diagramm dargestellt.

Höhenleistung LOCR 814 TDT

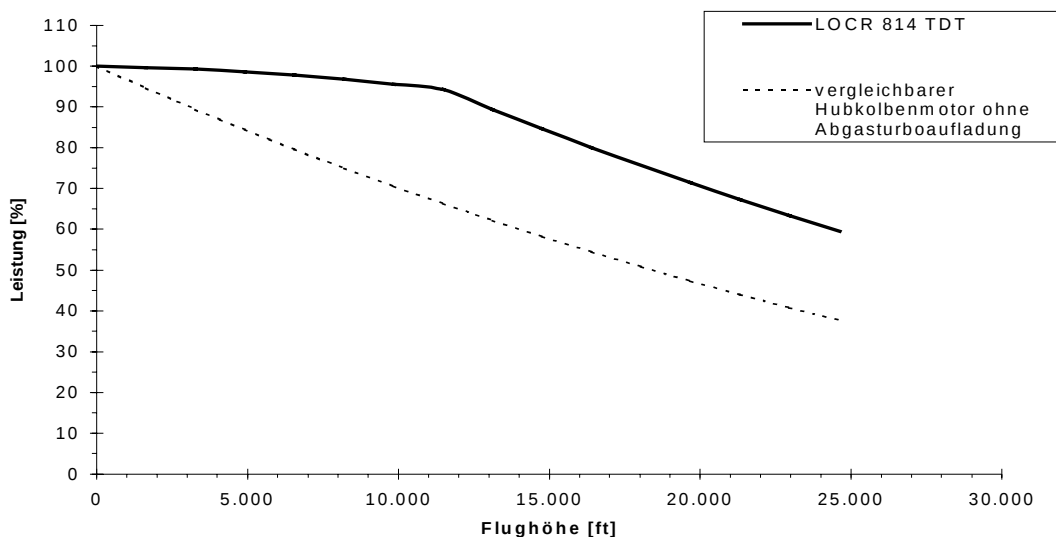


Bild 6.1.1: Einfluß der Druckhöhe auf die Triebwerksleistung mit und ohne Abgasturboaufladung

Bei der derzeitigen Auslegung tritt ein geringer Leistungsverlust bis in eine Druckhöhe von ca. 11.000 ft auf. In größeren Höhen kann der ausgewählte Abgasturbolader die Abnahme des Luftdruckes nicht weiter kompensieren. Durch die Verwendung eines größeren Abgasturboladers und / oder eines größeren Ladeluftkühlers kann eine weitere Leistungssteigerung in der Höhe erreicht werden. Dies jedoch bedeutet ein höheres Systemgewicht, ohne eine Leistungssteigerung im Boden. Eine entsprechend bessere Höhenleistung kann auf Wunsch, mit einer entsprechenden Gewichtszunahme, realisiert werden. Für extreme Höhen sind andere und eventuell mehrere Abgasturbolader (Registeraufladung) einzusetzen.

Grundsätzlich wird bei dem Motor eine TBO (time between overhaul) von 2000 h angestrebt. Der Nachweis hierfür muß allerdings in ausgiebigen Dauerlaufversuchen erbracht werden, die nicht zum Umfang des Vorhabens gehörten. Das Verhalten der verschleißanfälligen Bauteile konnte jedoch bereits mit Hilfe der Mustermotoren überprüft und hochgerechnet werden. Bei den Wartungsintervallen wird vorerst für die Sichtkontrolle, Filterreinigung und den

Zündkerzenwechsel von 100 Betriebsstunden, für die Motorinspektion von 500 Betriebsstunden ausgegangen.

6.1.2 Festlegung der Systemkonfiguration

Für die Erstellung der Mustermotoren wurde lediglich von einem Generator für das Bordnetz, die Motorüberwachungsinstrumente und die Motorelektrik als Zusatzaggregat ausgegangen und ein genormter Antriebsflansch zur Verfügung gestellt. Für weitere, vom konkreten Einbaufall im Fluggerät abhängige Zusatzaggregatkonfigurationen steht an der dem Brandschott zugewandten Endseite des Motors ein freies Antriebswellenende mit dem vollen Motormoment zur Verfügung.

Die Motorperipherie besteht aus folgenden Bauteilen:

- Wärmetauscher jeweils für das Motorkühlwasser, das Motoröl und die Ladeluft,
- Ölvorratsbehälter mit Filterung und Entgasung,
- Kraftstoffanlage, gegebenenfalls mit Vorförderpumpe, Wasser- und Gasblasenabscheider sowie Kraftstoffvor- und -rücklaufanschluß,
- einer motortyp-spezifisch angepaßten, schalldämmenden Abgasanlage,
- Motorträger,
- ggf. einem Propellergetriebe zur Reduzierung der Propellerdrehzahl (PSRU, propeller speed reduction unit).

Da weite Teile der Systemperipherie vom konkreten Einbaufall in ein Fluggerät abhängen, erfolgte nur eine Definition der Leistungs- und Schnittstellendaten der Peripherie.

6.1.3 Schnittstellendefinition

Im einzelnen stehen folgende Schnittstellen für die Leistungsabgabe sowie die Motorperipherie zur Verfügung:

- Befestigungsäugen zur Befestigung des Motors im Fluggerät mit Hilfe eines Motorträgers,
- ein Abtriebsflansch zur Leistungsabgabe, zusätzlich Befestigungsäugen und ein Zentrierdurchmesser an der Abtriebsseite des Motorgehäuses, z.B. zur Befestigung eines Propellergetriebes,
- ein Antriebswellenende für zusätzliche Peripherie an der Motorendseite,
- ein Generatorflansch nach AND 10261, optional ‚modified to wet‘ oder nach MS 3331, mit doppelter Motordrehzahl, jedoch umgekehrter Drehrichtung (‚reverse rotation‘),
- zwei 1-Zoll-Schlauchanschlüsse für das Motorkühlwasser bzw. zum Anschluß des Wasserkühlers und der Kabinenheizung; die notwendige Kühlleistung beträgt aufgrund der bisherigen Prüfstandsergebnisse ca. 53 kW,
- ein Ölschlauchanschluß (Drucköl) zum Motorölvorratsbehälter,
- ein Ölschlauchanschluß (Saugöl) zur Schmierölpumpe,
- ein Ölschlauchanschluß zum Ölfliter oder Ölkühler (Drucköl); die notwendige Kühlleistung beträgt aufgrund der bisherigen Prüfstandsergebnisse ca. 19 kW,
- ein Ölschlauchanschluß zu den Schmierstellen des Motors,
- ein Ladeluftanschluß zum Ladeluftkühler (Druck) für einen gewebearmierten Silikon-Luftschlauch; der Durchmesser ist vorläufig mit 50 mm spezifiziert, die notwendige Kühlleistung beträgt aufgrund der bisherigen Prüfstandsergebnisse ca. 11 kW,
- ein Ladeluftanschluß zum Einlaßsystem des Motors (Druck) für einen gewebearmierten Silikon-Luftschlauch,
- ein Schlauchstutzen zum Anschluß eines Stauluft-Kastens (‚air scope‘) mit Luftfilter; die Abmessung ist mit 60 mm spezifiziert,
- ein Abgasrohranschluß,

- je ein Kraftstoffschlauchanschluß für Vor- und Rücklauf; Abmessungen und Lagen können noch an die endgültige Einbauspezifikation angepaßt werden,
- ein Anschluß für den Leistungsverstellhebel; Amessungen und Lagen können noch an die endgültige Einbauspezifikation angepaßt werden,
- je ein Steckanschluß für die Leistungs- und Motorüberwachungselektrik.

Viele der aufgeführten Schnittstellendaten in einer vorläufigen Fassung festgelegt, da die endgültige Spezifikation der meisten Peripherieteile integrationsabhängig ist.

6.2 Funktionsmusterentwurf, Auslegung der Bauteile (AP 2)

6.2.1 Allgemeine Beschreibung

Da aus Kostengründen auf die bereits vorhandene Basiskonstruktion der LOCR-Baureihe mit der vorgegebenen Geometrie zurückgegriffen werden mußte, wurden alle Bauteile hinsichtlich Funktion und Gewicht konstruktiv überarbeitet, um sowohl den Anforderungen hinsichtlich der Belastung im Aufladebetrieb zu genügen, als auch ein möglich günstiges Leistungsgewicht zu erreichen. Dies wurde durch entsprechende Festigkeitsanalysen und FEM-Berechnungen unterstützt, siehe Abschnitte 6.2.3, 6.2.8 und 6.2.9. Dadurch sind zwar optimierte Hauptbauteile für den Kernmotor vorhanden, jedoch waren an der Basiskonstruktion grundlegende Änderungen vor allem auf der Seite des Aggregateträgers notwendig, um die für den vorgesehenen Einsatz notwendigen Aggregate einerseits über einen ausfallsicheren Zahnradantrieb mit entsprechenden Drehzahlverhältnissen anzutreiben und andererseits einen möglichst kompakten und platzsparenden Einbau zu erreichen, welcher nicht wesentlich über den Einbaudurchmesser des äußerst kompakten Grundmotors hinausreicht.

6.2.2 Aggregateträger

Für den Aggregateträger wurde nach eingehender Untersuchung verschiedener Varianten eine Getriebeanordnung nach Abbildung 6.2.1 (Ansicht Aggregateträgerschnitt mit Rädertrieb) gewählt. Abbildung 6.2.2 zeigt den zugehörigen Schnitt entlang der Linie C-C in Abbildung 6.2.1.

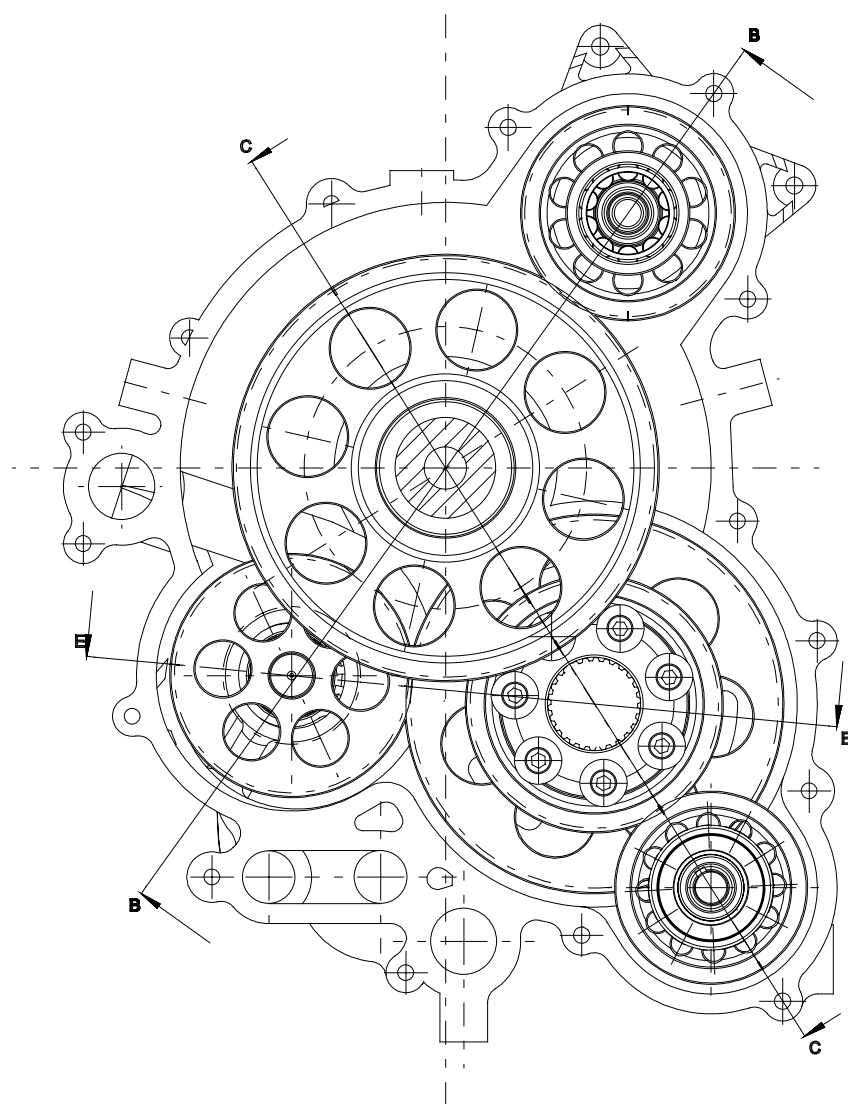


Bild 6.2.1: Getriebeanordnung im Aggregateträger des LOCOR 814 TD Turbo, Schnittebenen

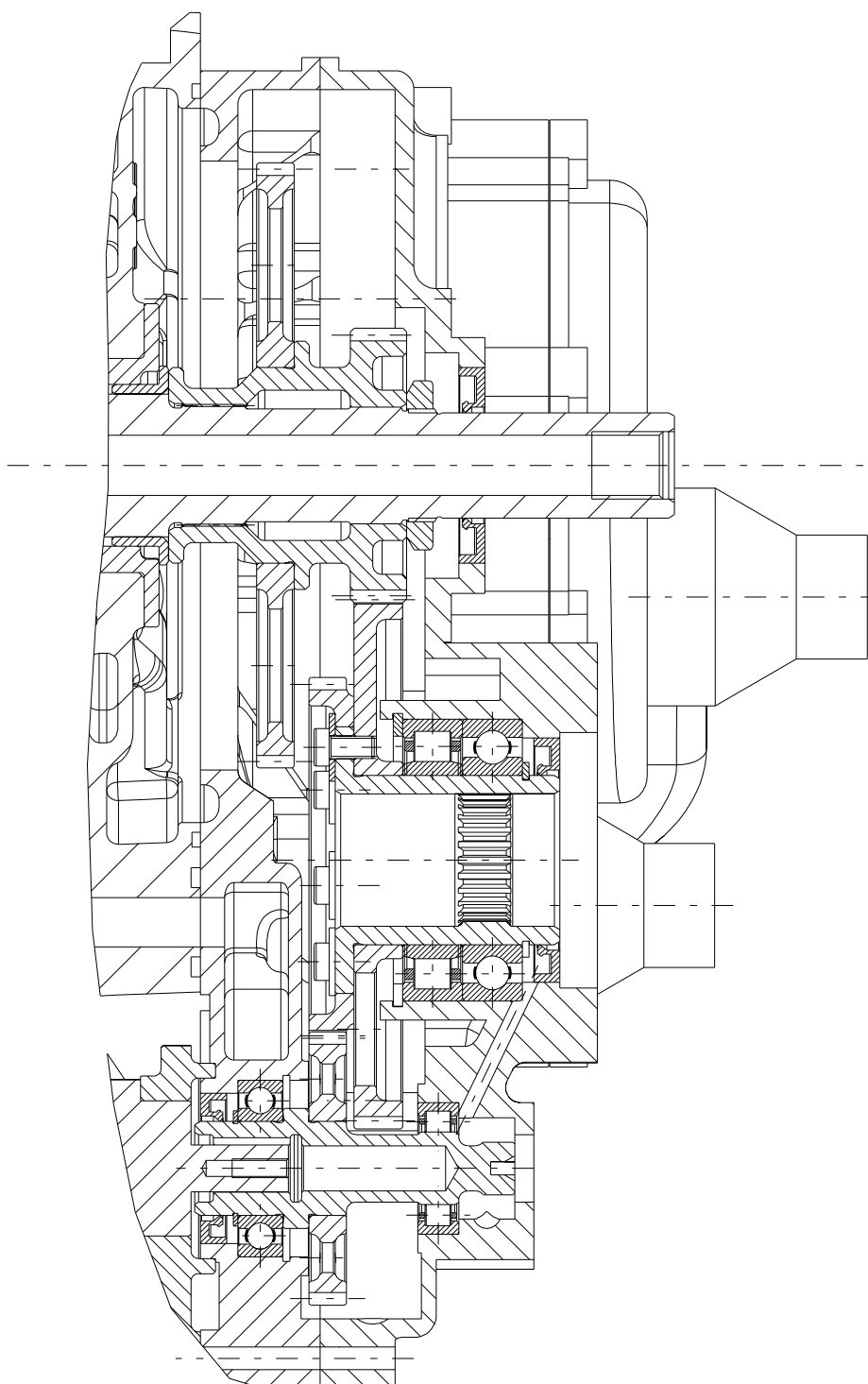


Bild 6.2.2: Schnitt C-C des Aggregateträgers

Die Motorwelle treibt hierbei über eine Zahnraduntersetzung 1:2 die mit halber Motordrehzahl laufende Verteilereinspritzpumpe an und über ein Zwischenrad den Antriebssatz für die

Trockensumpfpölpumpe einerseits und die gegenüberliegende Öldosierpumpe andererseits, siehe Abbildung 6.2.2. Diese Anordnung ist auf Abbildung 6.2.3 und 6.2.4 gut erkennbar mit der kleinen Öldosierpumpe auf der hinteren Motorseite und der Trockensumpfpumpe unterhalb der Läufergehäuse in Richtung Abtriebsseite. Die Trockensumpfpumpe besteht aus drei Elementen, wobei zwei davon als Absaugpumpen arbeiten und eine den Druckölkreislauf versorgt. Die Anordnung der Absaugeinheiten direkt unterhalb des Kernmotors ermöglicht eine besonders kompakte Bauform, die im Einbauraum störende Ölwanne entfällt; aber vor allem wird der Motor dadurch wesentlich lageunempfindlicher, was für die Anwendung im Flugbetrieb sehr vorteilhaft ist. Hierbei fördern die Absaugpumpen in einen separaten Ölbehälter, welcher die Ölstandskontrolle und die Entlüftung beinhaltet und der entsprechend der Einbauverhältnisse flexibel platziert werden kann. Die Pumpensektion für den Druckölkreislauf fördert über den Ölwärmetauscher und den Ölfilter direkt zu den Lagern und Schmierstellen im Motor. Direkt an dieser Pumpensektion ist ein einstellbares Überdruckventil angebracht, das bei einer teilweisen Verstopfung der Druckölseite einen Notlaufbetrieb ermöglicht.

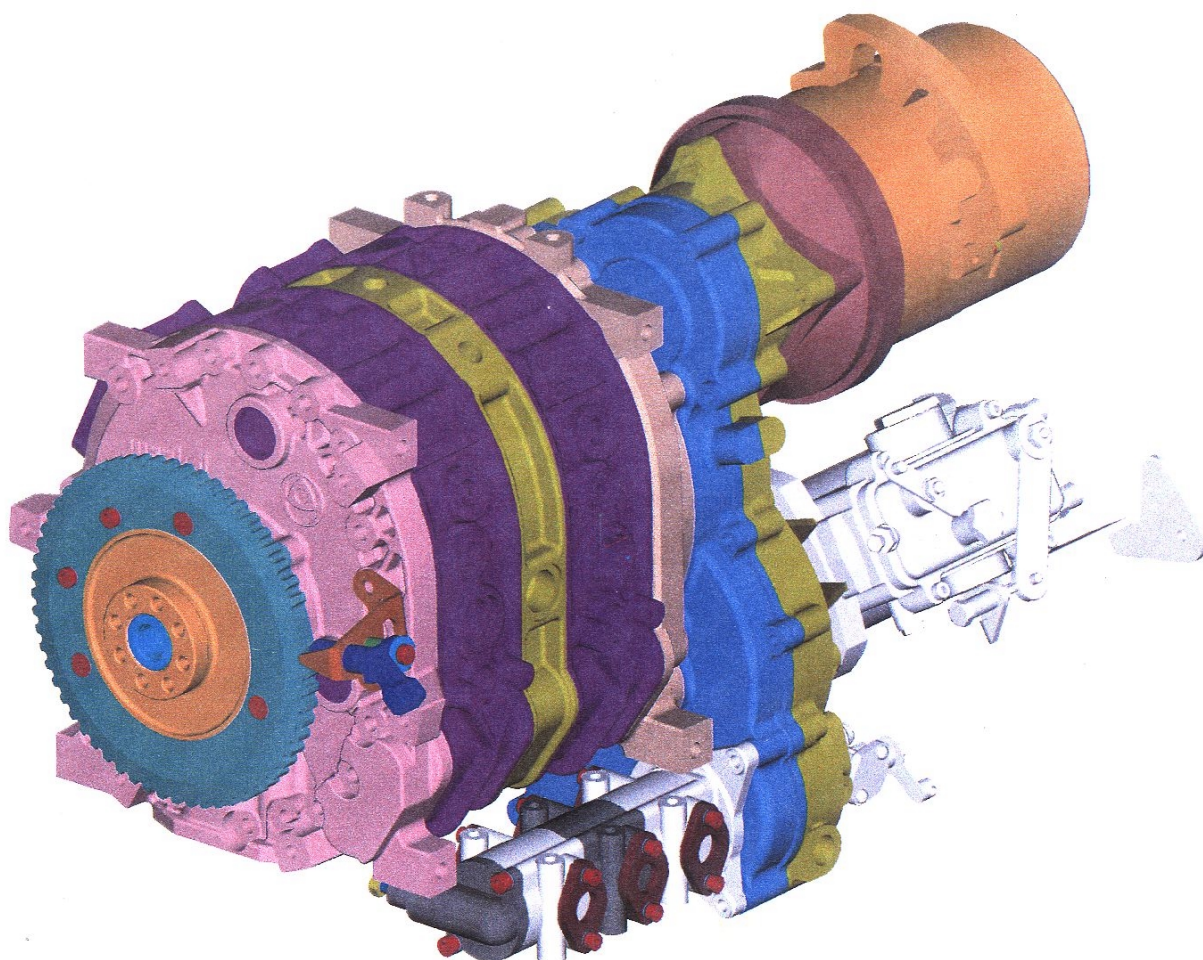


Bild 6.2.3: Außenansicht des Kernmotors mit bestücktem Aggregateträger

Die gegenüberliegend vom gleichen Antriebssatz angetriebene Öldosierpumpe liefert last- und drehzahlabhängig ausreichend bemessene Schmierölmengen zu den kritischen Laufpartnern im Motor, um dort die einwandfreie Funktion und geringen Verschleiß abzusichern.

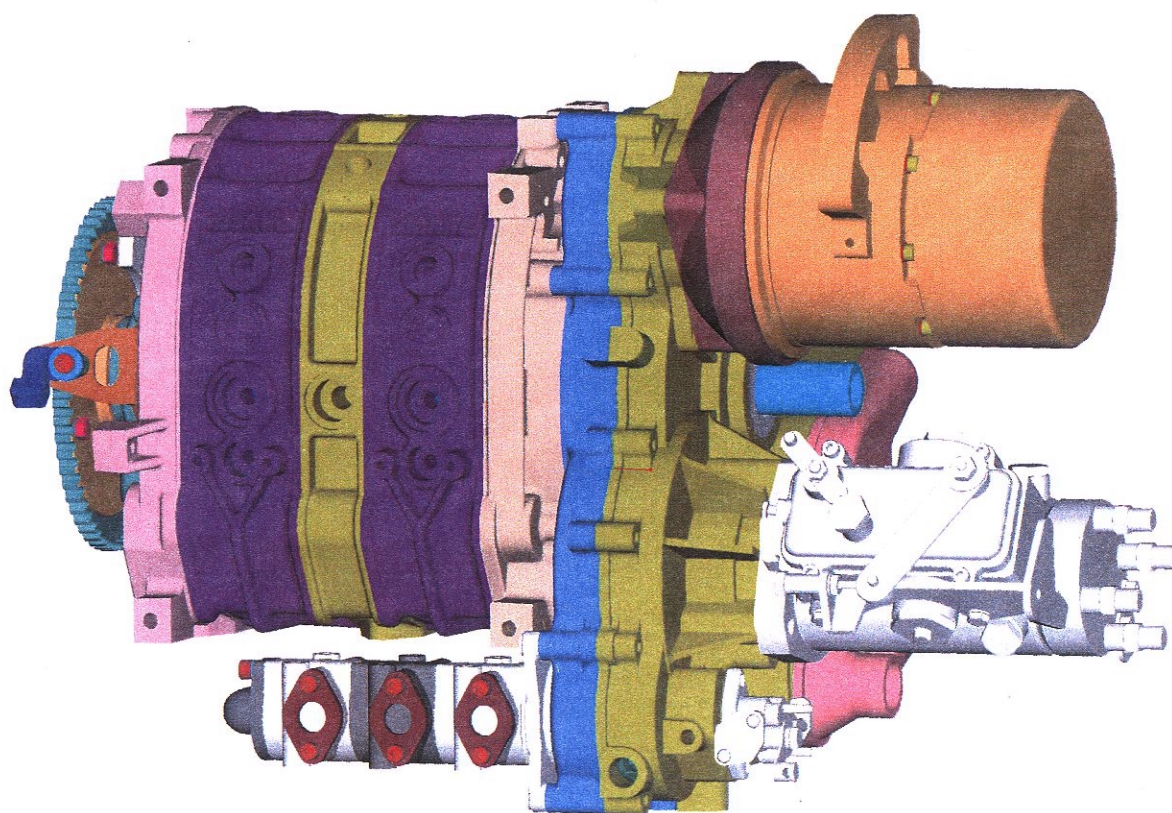


Bild 6.2.4: Seitenansicht des Motors

Abbildung 6.2.5 zeigt den Schnitt B-B in Abbildung 6.2.1, den Generatorantrieb mit einer Übersetzung 2:1 auf die doppelte Motordrehzahl. In der vorliegenden Version ist ein 28V-Turbinen-Gleichstromgenerator mit Luftfahrtzulassung und ca. 4 kW Leistung vorgesehen, welcher auch als Starter für den Anlaßvorgang dient. Es kann allerdings mittels eines Adapters ebenso ein anderes Produkt als reiner Generator mit Flanschanschluß angebracht werden, falls ein Anlasser auf der Abtriebsseite vorhanden ist.

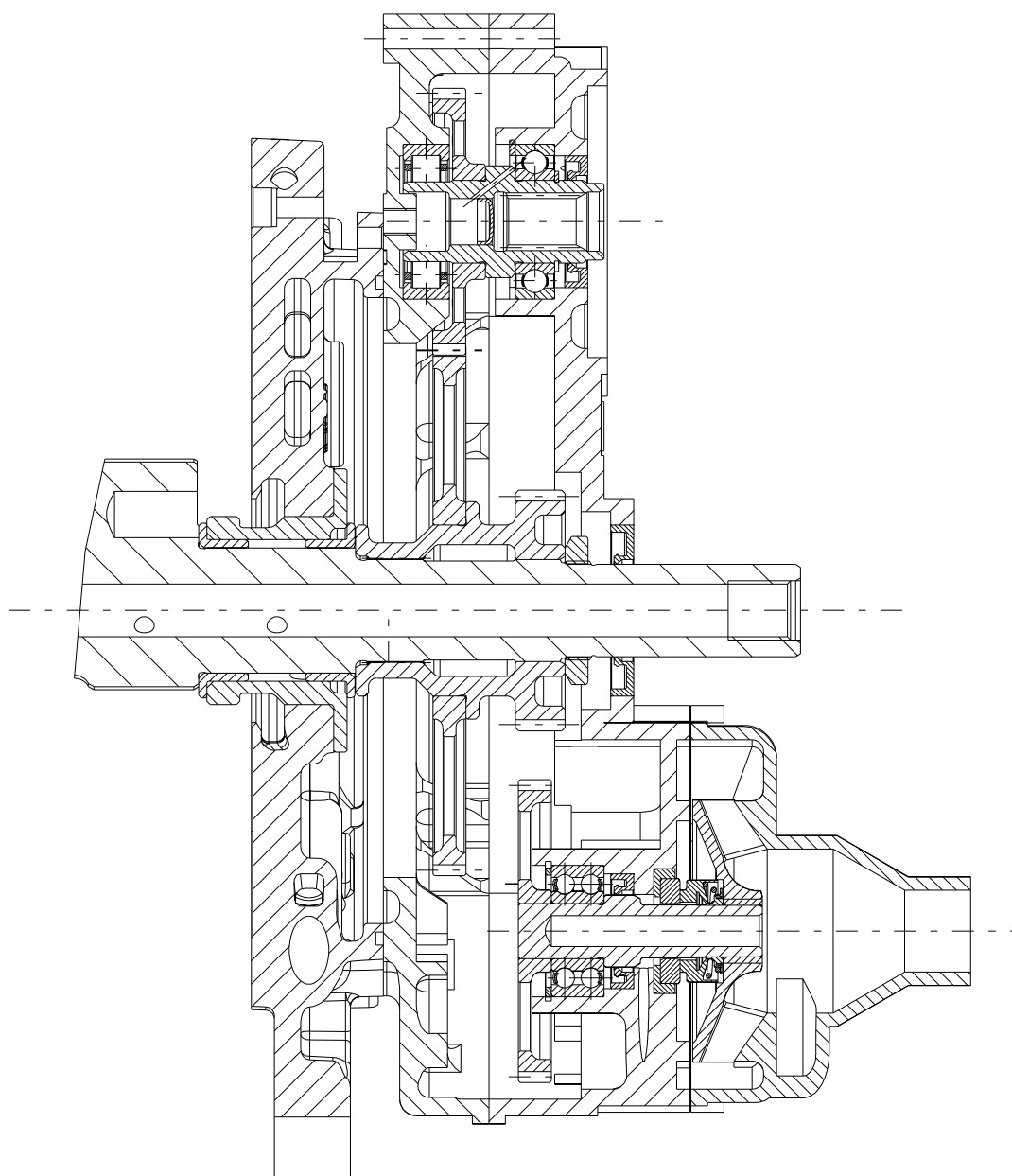


Bild 6.2.5: Schnitt C-C des Aggregateträgers mit Wasserpumpe und Generatorantrieb

Der Kühlwasserpumpenantrieb erfolgt über das Antriebsrad der Einspritzpumpe gemäß dem Schnitt E-E in Abbildung 6.2.1 wie in Abbildung 6.2.6 gezeigt. Diese Anordnung schafft noch genügend Platz für einen freien Wellendurchtrieb auf der Rückseite des Motors und bietet die zusätzliche Möglichkeit für Hilfsantriebe wie z.B. Hydraulikpumpen, falls erforderlich. Als Wasserpumpenrad wird ein optimiertes Kunststoffrad mit glatter Oberfläche und rückwärtsgekrümmten Schaufeln benutzt. Eine Anpassung bezüglich des erforderlichen

Mengenstroms und des Förderdrucks kann durch einfaches Abdrehen des Pumpenrades und des Wasserpumpendeckels erfolgen.

Abbildung 6.2.7 zeigt die Draufsicht auf den Aggregateträger mit Turbinen-Generator.

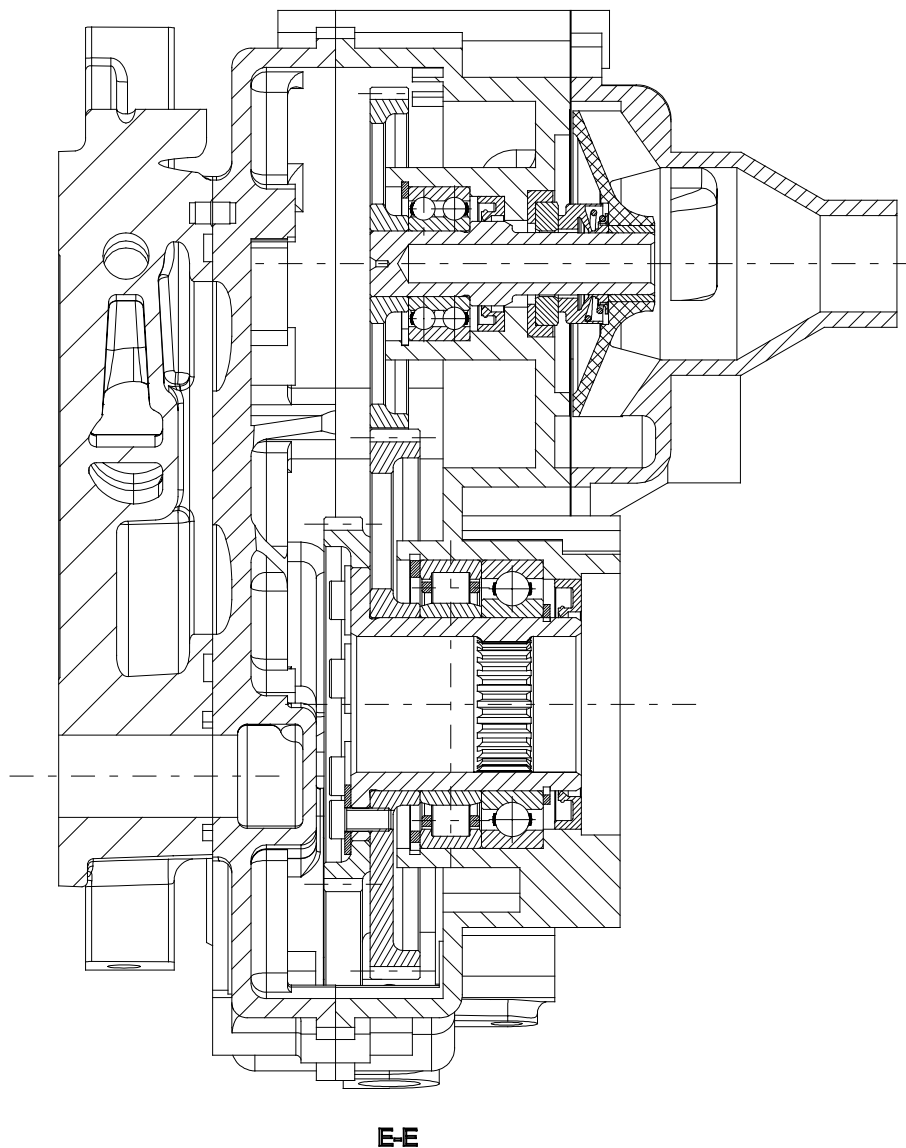


Bild 6.2.6: Schnitt E-E des Aggregateträgers mit Wasserpumpe und Einspritzpumpenantrieb

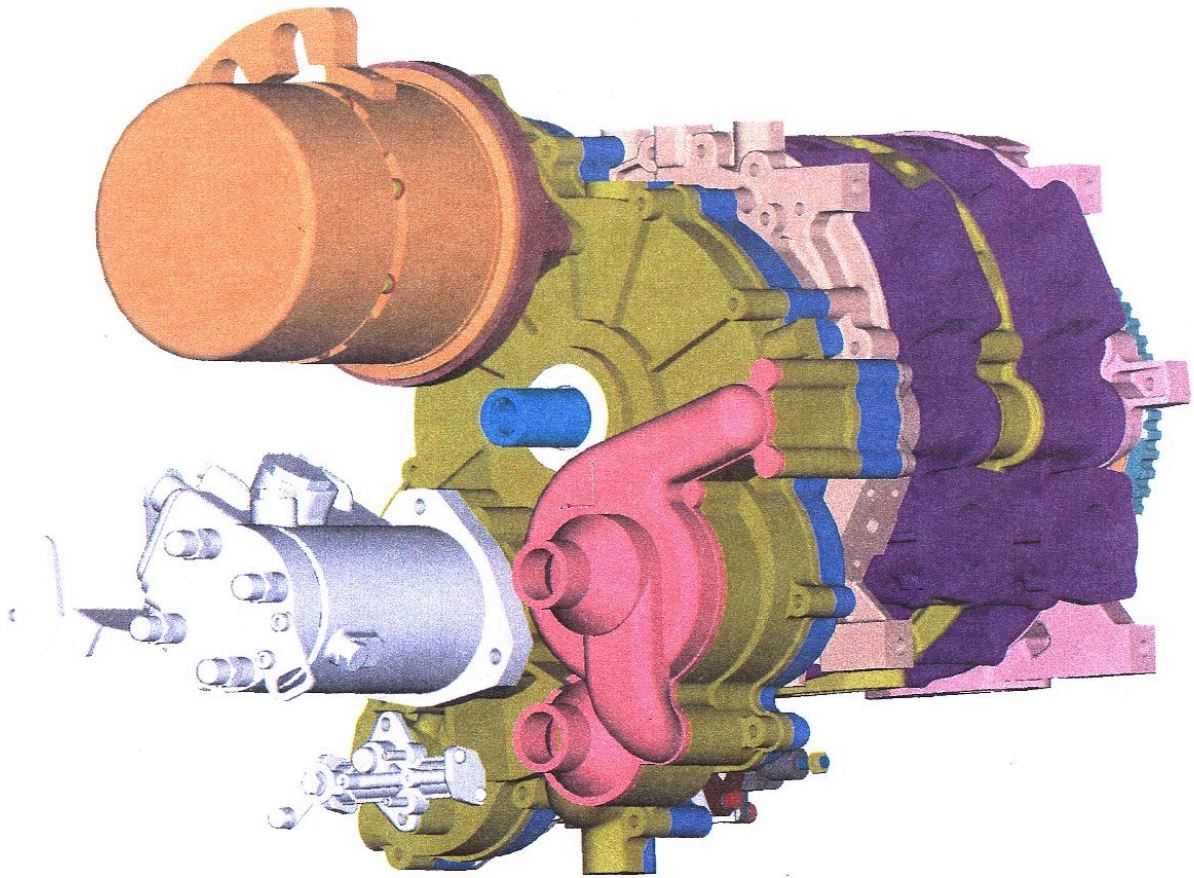


Bild 6.2.7: Ansicht des Aggregateträgers von der Motorendseite

6.2.3 Läufer

Der erste Entwurf des Läufers hatte keine ausreichende Steifigkeit der Läuferflanken. Die mit Hilfe der finiten Element Methode berechneten Verformungen und Spannungen sind nicht mehr im zulässigen Bereich. Konstruktionsmerkmale dieser Variante sind jeweils eine Stützrippe unter den Brennräumen sowie ein integriertes Hohlrad. Diese Merkmale ermöglichen eine erhebliche Gewichtsreduktion gegenüber herkömmlichen Konstruktionen.

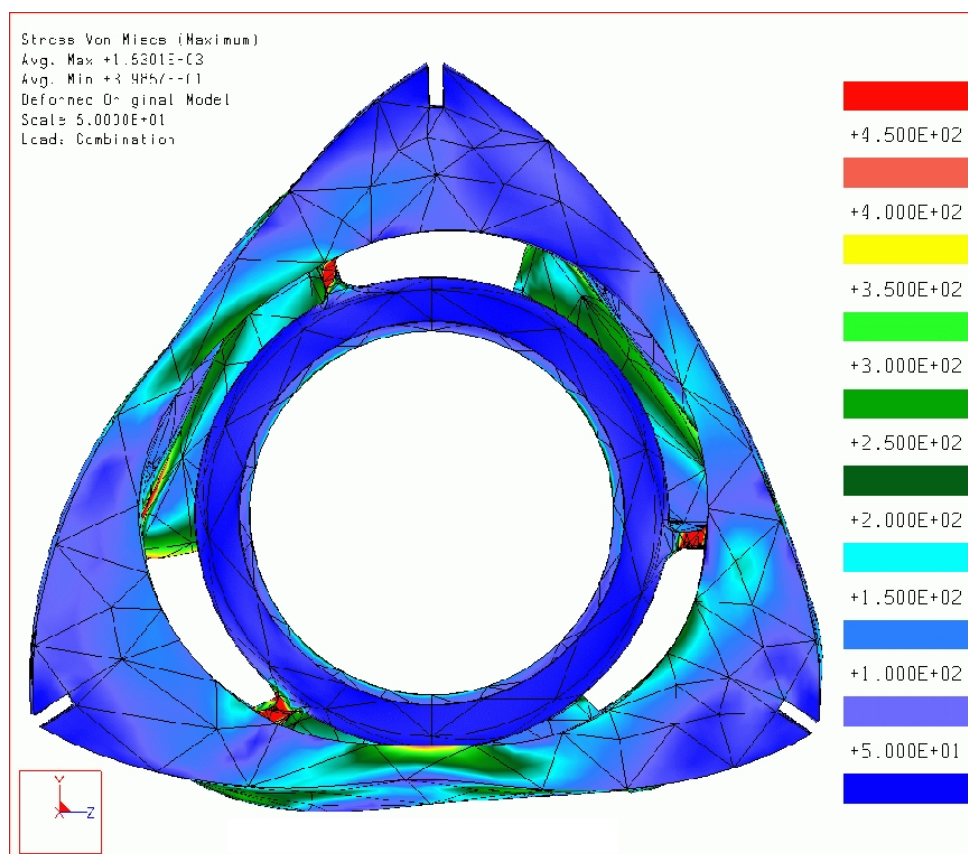


Bild 6.2.8: Spannungen und Verformungen (50-fach verstärkt dargestellt) des Läufers (Version "A") unter Druck- und Temperaturbelastung.

Durch die Druck- und die Temperaturbelastung auf den Läufer in der Version "A" entsteht eine zu große Durchbiegung der Läuferflanken. Die maximale Verschiebung der Flanke beträgt 0,2 mm.

Die Spannungen in den Rippen erreichen örtlich über 1500 N/mm². Hier besteht für das Bauteil potentiell die Gefahr des Versagens.

Aufgrund der Ergebnisse der ersten FEM-Berechnung ist die Verbindung der Läuferflanken zur Nabe vollständig überarbeitet worden. Da eine direkte Anbindung des Hohlrades an den Läufer aus produktionstechnischen als auch Kostengründen nicht sinnvoll ist, wurde ein Läufer mit eingeschraubtem Hohlrad realisiert. Zur Absicherung dieser Konstruktion wurde eine erneute Berechnung mit Hilfe der finiten Element Methode durchgeführt.

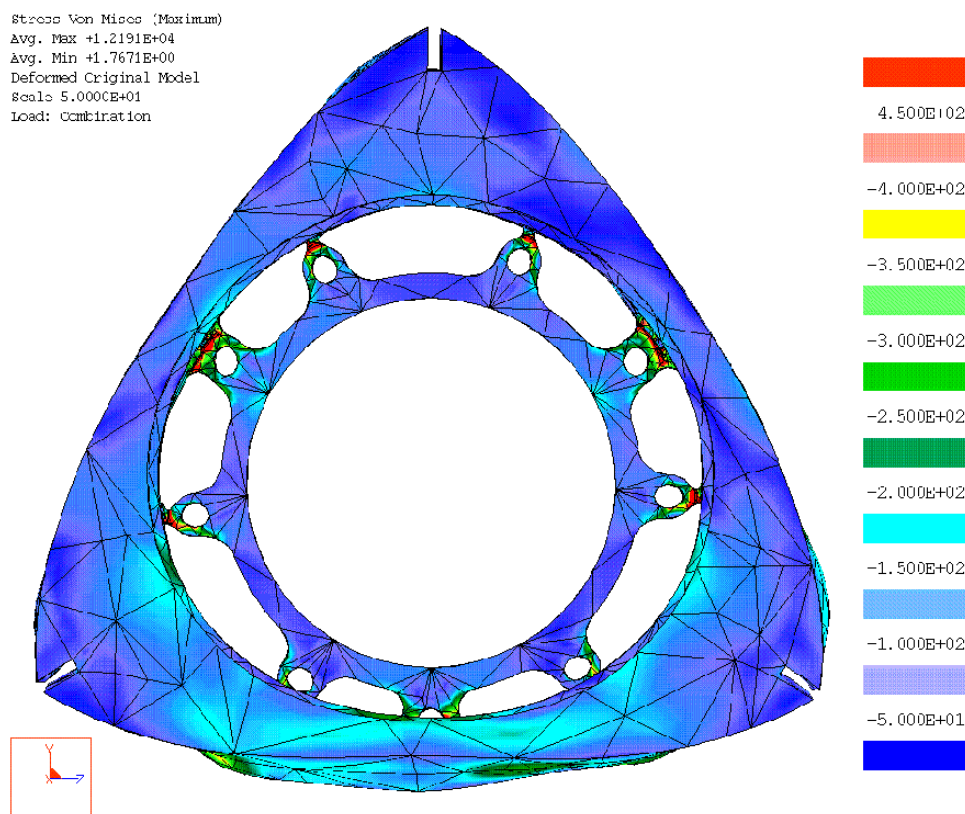
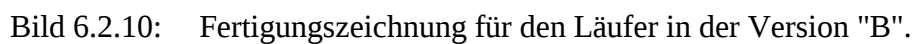


Bild 6.2.9: Spannungen und Verformungen (50-fach verstärkt dargestellt) des Läufers (Version "B") unter Druck- und Temperaturbelastung.

Die Durchbiegung der Läuferflanken ist auch in der Version "B" noch recht groß, jedoch konnten die Spannungen im Bauteil deutlich reduziert werden. Aufgrund der Berechnungsergebnisse wurden die Läuferflanken durch eine zusätzliche innere Verstärkungsrippe steifer ausgeführt.

Weiterhin wurden die Rippen zur Anbindung der Flanken an die Narbe verstärkt und mit größeren Übergangsradien versehen. (Fertigungszeichnung siehe Bild 6.2.10)

Die erste Charge gefertigter Läufer wurde hinsichtlich der Wuchtigkeit untersucht. Mit maximal ca. 300 gmm Unwucht bei einem Eigengewicht von ca. 1,7 kg liegt der Läufer an der Grenze des für einen Kreiskolbenmotor noch zulässigen Bereichs. Für eine Serienproduktion müßte untersucht werden, ob sich die Fertigung so optimieren läßt, daß auf ein zeitaufwendiges Nachwuchten des Läufers generell verzichtet werden kann. Die Erprobung von Musterläufern in einem Einläufer-Aufbau erbrachte den Nachweis der Festigkeitsberechnungen.



6.2.4 Gasdichtsystem

Das Gasdichtsystem wurde konstruktiv spezifiziert und in den LOCR-Meßmotoren im Einsatz erfolgreich erprobt. Lediglich der Verschleiß der bisher verwendeten Dichtleisten aus einem Spezial-Kolbenringguß (IKA-Material) ist offensichtlich bedingt durch die hohen Mittel- und Spitzendrücke unbefriedigend hoch. Deshalb fanden Versuche mit Leisten aus einem Metall-Keramik-Verbund sowie Nitrid-Keramik in Verbindung mit Veränderungen der Ölzuführung der Verlustschmierung statt. Die genannten Werkstoffe bieten neben einer erheblich erhöhten Verschleißfestigkeit Vorteile in der Wärmeleitung, Wärmedehnung und dem spezifischem Gewicht. Nachteilig sind die bezogen auf die geringe Stückzahl der Mustermotoren sehr hohen Fertigungskosten. Die sonstigen Bauteile des Gasdichtsystems wurden aufgrund der bisherigen Erfahrungen unverändert übernommen.

6.2.5 Öldichtsystem

Als Öldichtsystem wurde bislang bei allen LOCR-Motoren ein System aus Radialwellendichtringen mit PTFE-Dichtlippe sowie Schleuderscheiben benutzt. Vorteil dieses Konzepts ist eine hervorragende Öldichtigkeit unter allen Bedingungen. Bei den Vorversuchen zeigte sich jedoch, daß durch die hohen Mittel- und Spitzendrücke die Dichtlippen zu stark angepreßt werden. Der zu hohe Anpreßdruck bewirkt einen vorzeitigen Verschleiß der Dichtung, was zu kurzfristigem Versagen führt. Nach weiteren eingehenden Versuchen wird nun ein metallischer Kratzring mit einer Tellerfeder zur Ölabdichtung eingesetzt. Die Bauteile befanden sich mit ausreichender Öldichtigkeit im Meßmotor im Einsatz. Nachteilig ist die erhöhte Reibung bei dieser Konzeption, was den Kraftstoffverbrauch negativ beeinflusst. Entwicklungsarbeiten zur weiteren Verbesserung des Verschleißverhaltens sind möglich, wurden im Rahmen des Vorhabens aber nicht durchgeführt; damit kann ein geringer Ölverbrauch auch über lange Laufzeiten gewährleistet werden.

6.2.6 Gleitlager

Die ausgewählten Gleitlager der Exzenterwelle haben sich im Meßmotor bestens bewährt und wurden unverändert für den Motor LOCR 814 TD Turbo übernommen.

Das Läuferlager mit Schmiernut besteht in der herkömmlichen Bauform aus einer Tragschicht und einer aufgewalzten Laufschrift. Bei Motorversuchen mit hohen Spitzendrücken hat es Ausplatzungen in der Laufschrift gegeben, deshalb wurde bei den Mustermotoren auf die Schmiernut im Lager verzichtet und stattdessen eine Schmiernut in ein Viertel des Exzenterumfangs eingebracht. Die Veränderung hat sich in Motorversuchen als standfest erwiesen.

Eine Verwendung von Gleitlagern mit galvanisch aufgebrachtener Laufschrift ist ebenfalls möglich, um für den kritischen Anwendungsfall eine erhöhte Reserve zu haben.

6.2.7 Steuerverzahnung

Die Steuerverzahnung wurde komplett überarbeitet und gewichtsoptimiert. (Fertigungszeichnungen siehe Bild 6.2.11 und 6.2.12)



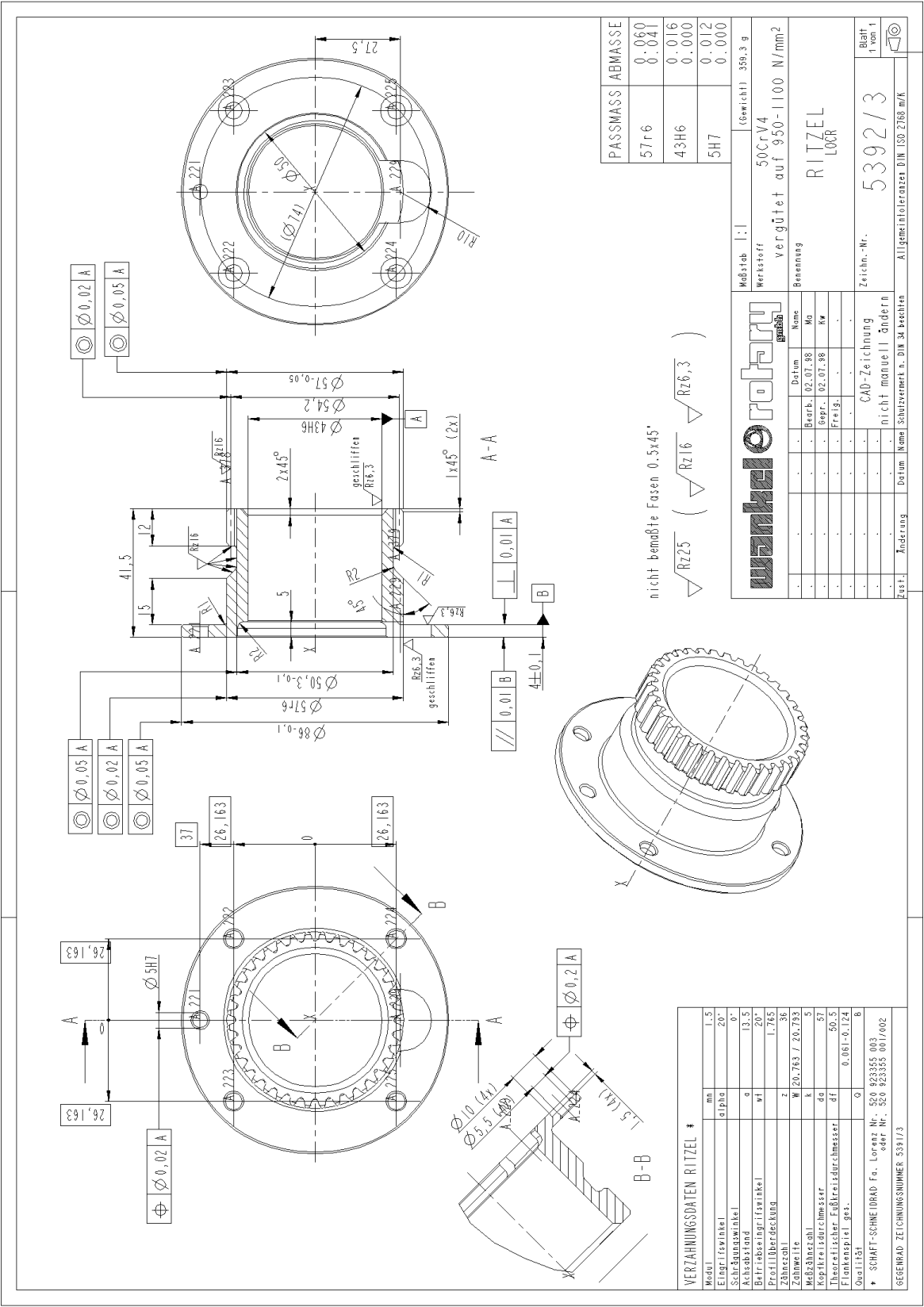


Bild 6.2.12: Fertigungszeichnung des Ritzels

6.2.8 Trochoide

Der Wassermantel der Trochoide wurde überarbeitet und die Struktur gewichtsoptimiert. Zur Absicherung der Konstruktion wurde eine Berechnung mit Hilfe der finiten Element Methode durchgeführt. Die Ergebnisse der Berechnung führten zu weiteren Detailverbesserungen am Bauteil.

Aufgrund des symmetrischen Aufbaues wurde die Trochoide im Halbschnitt mit einer simulierten Seitenscheibe gerechnet. Es wurde nur die Belastung durch den Verbrennungsdruck simuliert, da diese ausschlaggebend für die Festigkeit ist. Der Temperatureinfluß ist bedingt durch die Wasserkühlung vernachlässigbar.

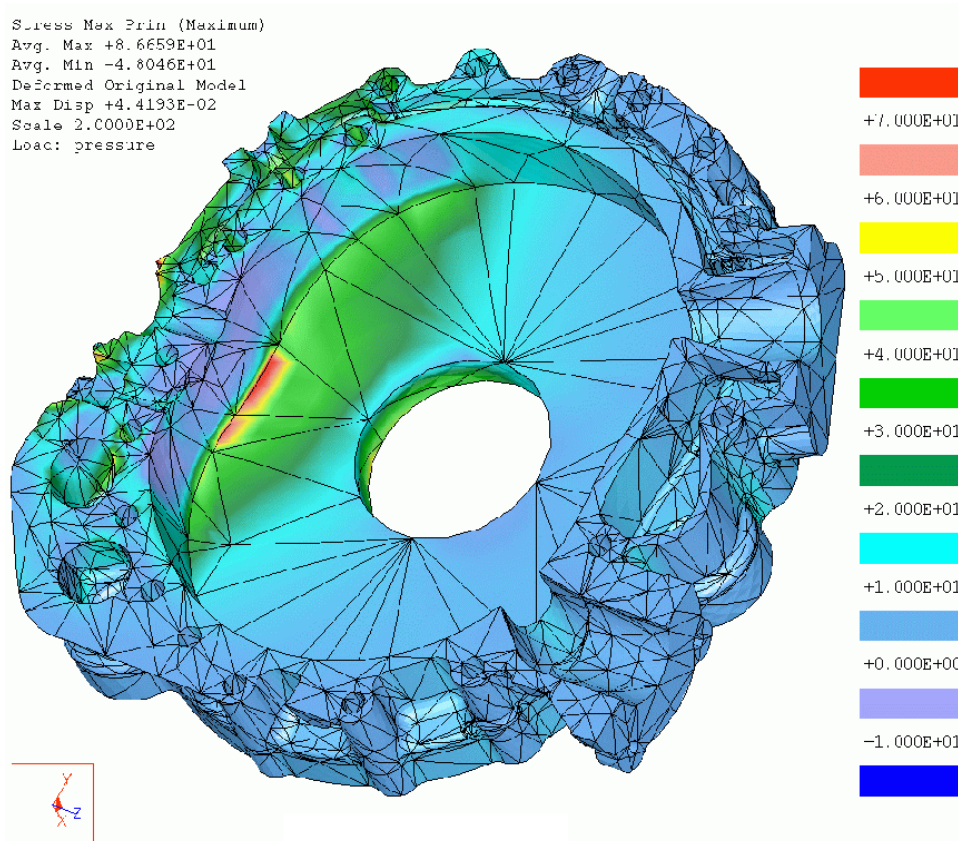


Bild 6.2.13: Spannungen und Verformungen in der Trochoide bei maximalem Verbrennungsdruck.

Die Spannungen in der Trochoide liegen im zulässigen Bereich. An einigen Stellen, insbesondere an Übergangsradien, ist jedoch das Spannungsniveau hoch. Zur Verbesserung der Dauerfestigkeit wurden diese Bereiche konsequent überarbeitet. In Bild 6.2.14 sind die Spannungskonzentrationen im Bereich des Kühlwassereintrittes gut zu erkennen. Durch größere Radien und zusätzliche Verstärkungsrippen wurden die kritischen Bereiche entschärft.

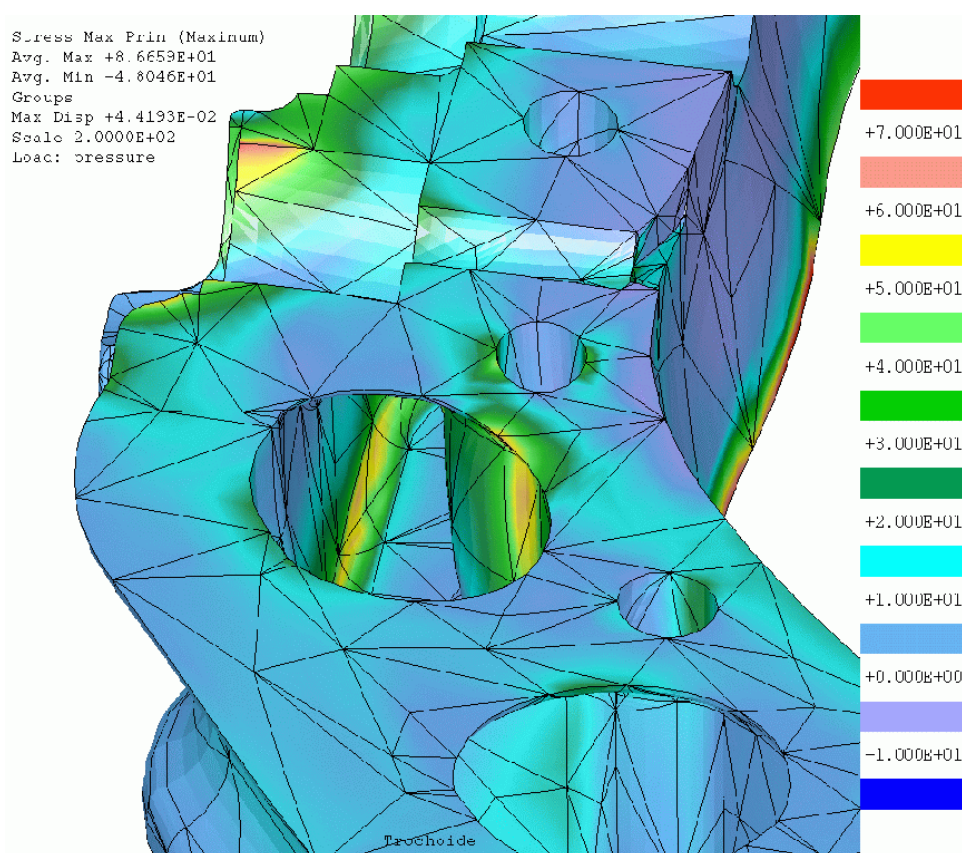


Bild 6.2.14: Detailansicht der Spannungen in der Trochoide.

Die Fertigungszeichnung für die Trochoide ist nach den Modifikationen erstellt worden. Die Positionierung von Ein- und Auslaß, sowie der Spritz- und Zündöffnung sind darin eingetragen.

6.2.9 Seitenscheiben

Für eine der beiden Seitenscheiben wurde nach der Konstruktion mit Zeichnungserstellung eine FEM-Berechnung durchgeführt. Ausgewählt wurde die Seitenscheibe Endseite mit Anschluß zum Aggregateträger wegen der filigranen Struktur sowie der kombinierten Axial- und Radiallagerung. Bei der Berechnung der Spannungen zeigten sich einige kritische Stellen an der Anbindung des Ritzels und des Exzenterwellenlagers, siehe folgende Abbildungen.

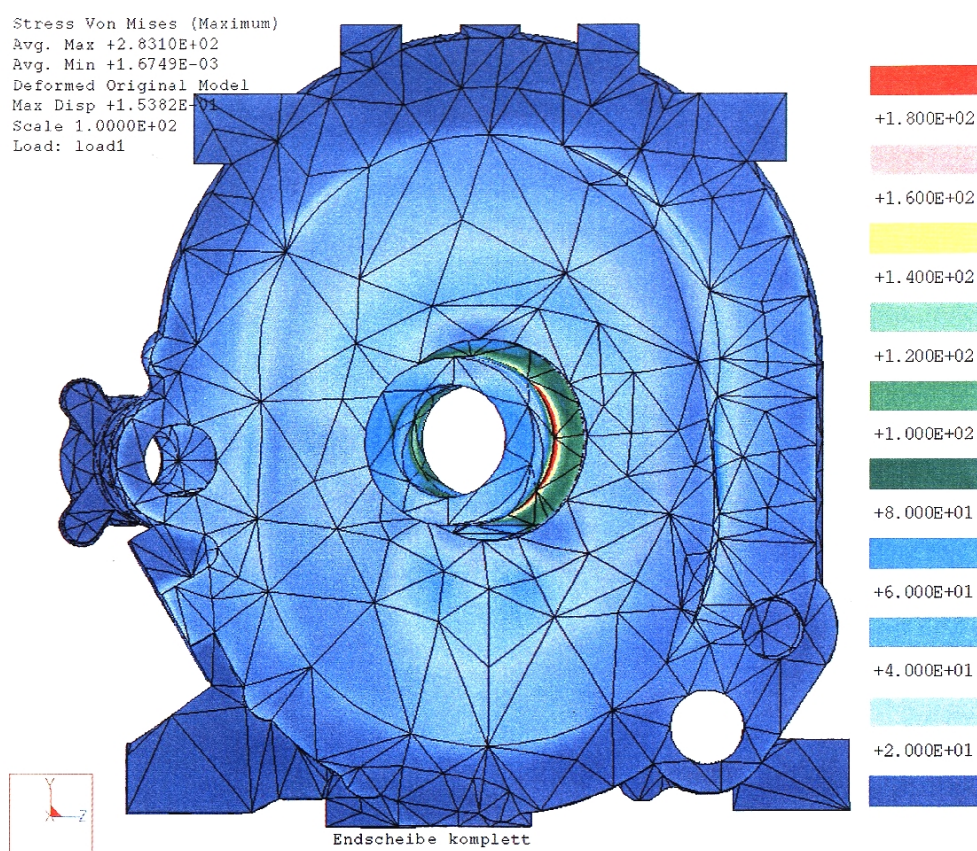


Bild 6.2.16: Ansicht der Seitenscheibe Endseite vom Kernmotor mit eingesetztem Ritzel

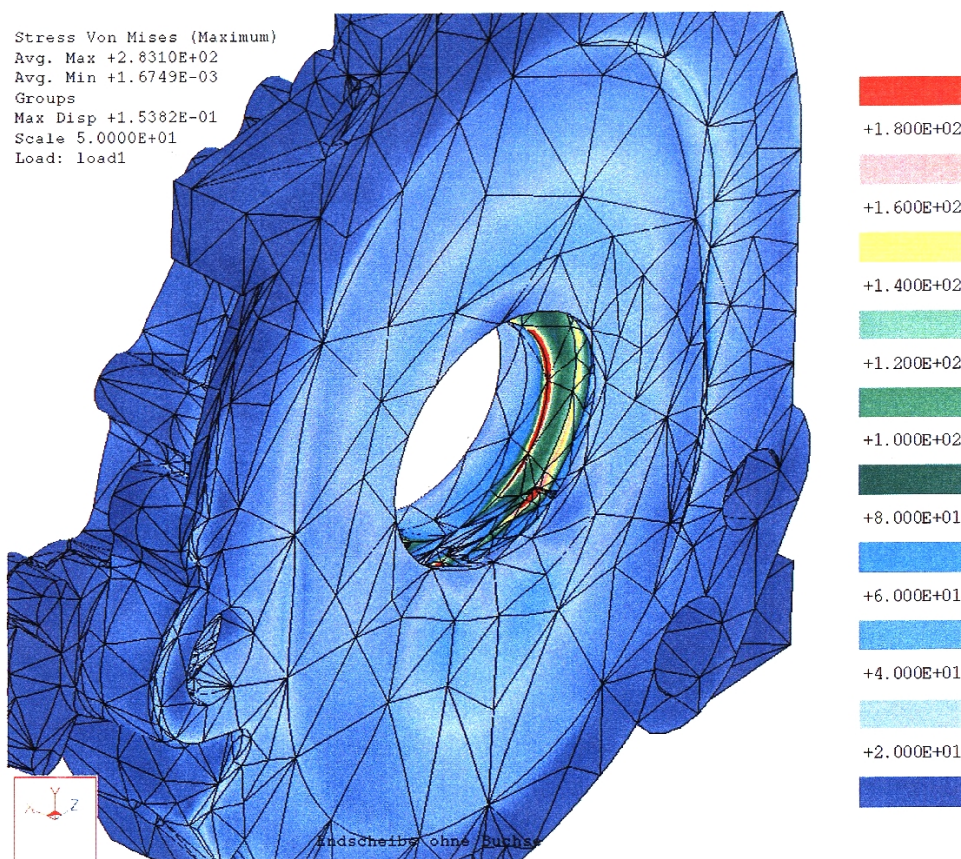


Bild 6.2.17: Detailansicht der Seitenscheibe Endseite vom Kernmotor, ohne Ritzel

In diesen Bereichen wurden deshalb die Wandstärken erhöht und die Radien vergrößert.

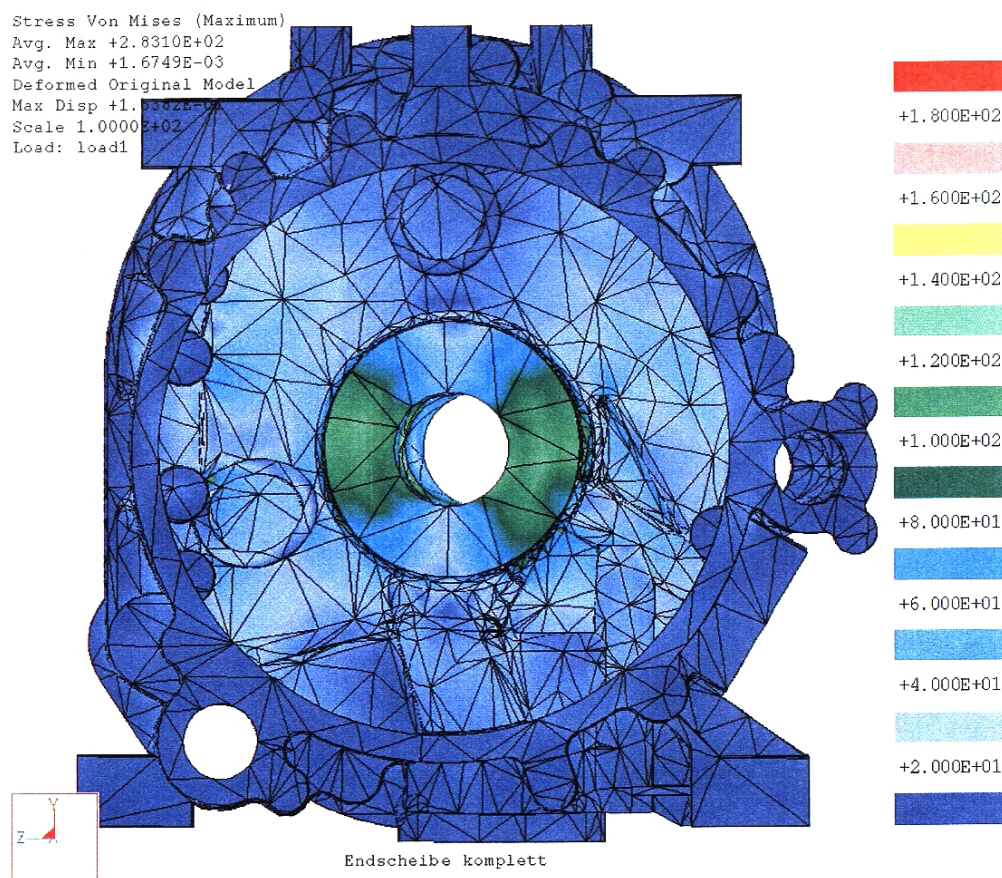


Bild 6.2.18: Ansicht der Seitenscheibe Endseite vom Aggregateträger mit eingesetztem Ritzel

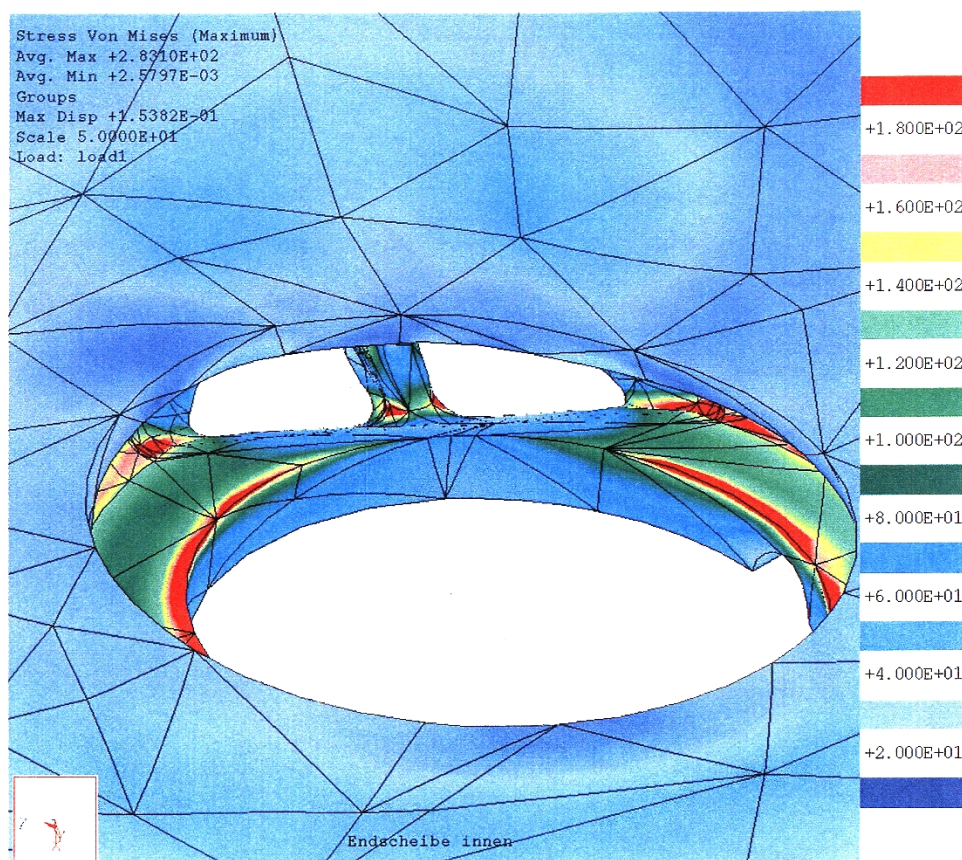


Bild 6.2.19: Seitenscheibe Endseite, Detailansicht der Ritzelanbindung

6.2.10 Exzenterwelle

Die Konstruktionszeichnung der Exzenterwelle mußte in Berichtszeitraum wegen der notwendigen Änderungen bei der Motorperipherie mehrfach geändert werden, um die Anschlußmaße zu erhalten.

Die Gestaltung der Exzenterwelle wurde aus dem Know-how weiterentwickelt, das in der vergangenen Zeit mit den LOCR-Motoren gesammelt wurde.

6.2.11 Ausgleichsgewichtegruppe

Die Ausgleichsgewichtegruppe wurde konstruktiv ausgearbeitet. Die tatsächlich benötigte Ausgleichsmasse ist im wesentlichen vom Läufergewicht abhängig. Die Gewichtsverteilung im Läufer ist jedoch abhängig von der Gußgenauigkeit.

Der Ausgleichsgewichteträger auf der Abtriebsseite ist im Rahmen einer Funktionsintegration mit dem Abtriebsflansch und dem Index-Zahnkranz (60 Zähne, 1 Index) für die Winkelposition der Exzenterwelle verbunden. Auf der gegenüberliegenden Seite trägt das Antriebsrad des Generators im Aggregateträger das Ausgleichsgewicht. Die Befestigung der Ausgleichsgewichte ist so gestaltet, daß verschiedene Gewichtegrößen winkelschieblich angebracht werden können.

6.3 Auswahl der Motorperipherie (AP3)

6.3.1 Kühlsystem

Der interne Kühlkreislauf wurde im Prinzip unverändert von der Motorenserie LOCR übernommen, jedoch wurde die Kühlwasserpumpe völlig neu konstruiert sowie der Typ und die Lage des Thermostats geändert. Förderdruck und Drucksatz der neuen Wasserpumpe können durch einfaches spanendes Bearbeiten des Kunststoff-Pumpenrades bzw. des Wasserpumpendeckels dem Bedarf angepaßt werden. Im externen Kühlkreislauf sind Kühler und Ausgleichsgefäß (abhängig vom Einbaufall) angeschlossen. An vielen Stellen des Kernmotors sind Entlüftungstopfen vorhanden, an denen bei ungünstigen Einbaulagen zusätzliche Entlüftungseinrichtungen angebracht werden können. Auf dem Propellerprüfstand von WANKEL ROTARY ist ein System nach einem ähnlichen Prinzip bereits aufgebaut und erprobt worden.

Ladeluft- und Ölkühler sind stark von dem konkreten Einbaufall (Luftströmung) abhängig, es wurden deshalb vorläufige Schnittstellen festgelegt. Für die Versuche auf dem Motorprüfstand werden Ladeluft und Schmieröl mit Wasser gekühlt.

6.3.2 Schmierstoffsysteme

Das interne Schmier-system ist mit der konstruktiven Gestaltung der Bauteile festgelegt. Das Öl wird extern aus den Ölrückflüssen einer Sammelwanne zugeführt. Aus diesem Sammler sowie aus dem Turbolader-Lagergehäuse und einer Stelle im Aggregateträger wird das Motoröl von zwei Trockensumpf-Ölpumpen in den Vorratsbehälter mit Gasabscheidung gepumpt. Da die im Gesamtkreislauf befindliche Ölmenge nach Einbaufall variiert, kann der Vorratsbehälter in Größe und Form angepaßt werden. Eine Schmierölpumpe mit integriertem, einstellbaren Sicherheitsventil fördert das Drucköl durch einen Filter und ggf. einen Ölkühler mit Thermostat zu einem zentralen Eintritt in den Kernmotor. Im Kernmotor befindet sich ein Schieber, der den Öldruck regelt. Schmierölpumpe und Trockensumpf-Ölpumpen sind zu einer kompakten, modularen Einheit zusammengefaßt, die zugeliefert wird. Die Leistung der Pumpen läßt sich durch Tausch der Elemente variieren. Ebenso lassen sich weitere Pumpen anreihen, um ggf. zusätzliche Absaugstellen zu bedienen.

Die Ölleitungen zwischen den Ölpumpen, dem Motor, Vorratsbehälter und Kühler wurden so kurz wie möglich ausgeführt.

Die ausgewählte Öldosierpumpe erhält die Ölversorgung intern über eine Drosselstelle aus dem Druckölkreis mit einem geringen Vordruck; eine Schmierstelle im Aggregateträger wird über dasselbe Reservoir bedient. Die Abgänge der Öldosierpumpe werden mit externen Schlauchleitungen zu den Motoreinlässen geführt. Dieses System sowie die Öldosierpumpe haben sich bereits bei einem millionenfach hergestellten Wankelmotor im Automobilsektor bewährt.

6.3.3 Einspritzsystem

Nachdem anfänglich ein Common-Rail-Kraftstoffeinspritzsystem eingesetzt werden sollte, waren mehrfache Vorgespräche (BOSCH, DUAP und Ganser-Hydromag) nicht zielführend. Im Rahmen der Analyse verfügbarer alternativer Systeme wurde nach weiteren Gesprächen mit möglichen Zulieferern ein mechanisches Hochdruck-Einspritz-System gewählt. Es war vorgesehen, in diesem Rahmen ein maßgeschneidertes Produkt der Firma LUCAS einzusetzen. Entsprechende Vorversuche waren bereits durchgeführt, als LUCAS die Unterstützung abgebrochen hat. Die Basis für die Einspritzanlage bildet nun vorläufig eine herkömmliche Radialkolben-

Verteilereinspritzpumpe mit integrierter Vorförderpumpe aus dem Fahrzeug- und Stationärmotorenbau; der Hersteller ist ebenfalls LUCAS. Die Pumpe wird derart von WANKEL ROTARY umgearbeitet, daß eine einwandfreie Funktion an einem Zweiläufer-Kreiskolbenmotor gegeben ist. Dazu werden pumpeninterne Teile bearbeitet bzw. ersetzt und überzählige Hochdruckausgänge verschlossen, so daß sich die Einspritzfrequenz verdoppelt. Zur Überprüfung der korrekten Funktion wurde im Vorfeld ein Muster hergerichtet, mit dem auch Tests zu Verschleiß und Einspritzcharakteristik absolviert wurden. Der Betrieb mit leichten und mittelschweren Dieseldieselkraftstoffen hat sich dabei als unproblematisch erwiesen, jedoch ist in der momentanen Konfiguration ein **dauerfester** Betrieb mit Kerosin / Jet A nur durch Zumischen von Öl im Verhältnis von ca. 1:30 möglich. Eine Überarbeitung für den reinen Kerosinbetrieb konnte innerhalb dieses Vorhabens nicht erfolgen.

Bei der Pumpe stehen noch verschiedene Zusatzeinrichtungen oder Optionen zur Auswahl. Die Konfiguration für die Anwendung hängt jedoch von dem konkreten Einbaufall ab. Eine Nachrüstung ist möglich. Der in die Pumpe integrierte Drehzahlregler bildet die Voraussetzung für eine Einhebel-Bedienung.

Antriebs- und Steuerschnittstelle der Pumpe zum Motor ist ein genormter SAE-Klemmflansch mit Index. Die Hochdruckleitungsanschlüsse sind nach DIN 73 365 Blatt 3 genormt.

Die Einspritzdüsen der genormten Größe ‚P‘ sind mit einem speziellen Lochbild für den LOCR-Motor hergestellt. Öffnungsdruck, Düse und Düsenhalter konnten von der LOCR-Serie übernommen werden; lediglich die Bohrungsgröße mußte entsprechend der größeren Einspritzmenge aufgeweitet werden. Die Diesel-Einspritzrohre zwischen der Verteiler-Einspritzpumpe und den Düsenhaltern sind genormte Stahlleitungen nach DIN 73 000 mit einem Außendurchmesser von 6 mm und einem Innendurchmesser von 1,5 mm. An den Düsenhaltern sind Leckölanschlüsse, die mittels Schläuchen mit dem Kraftstoffrücklauf der Verteilereinspritzpumpe verbunden sind. Als externe Peripherie wird eine fein gefilterte, gasblasen- und wasserfreie Kraftstoffversorgung vorausgesetzt; die Saughöhe zur Pumpe darf 1,5 m nicht überschreiten.

Bei größeren Saughöhen ist eine Zuführung zu der mechanischen Hochdruck-Einspritzpumpe notwendig mittels einer weiteren Vorförderpumpe am Tank nötig.

Die beschriebenen Elemente der Kraftstoffeinspritzung sind durch entsprechende Teile in Common-Rail-Technik ersetzbar, sobald diese verfügbar werden und ihre Zuverlässigkeit nachgewiesen ist. Beispielsweise wird in naher Zukunft eine Rail-Pumpe eines US-Herstellers mit dem gleichen Antriebsflansch wie die Radialkolben-Verteilereinspritzpumpe im Markt erhältlich sein.

6.3.4 Starter-Generator

Für die Mustermotoren ist ein 28 V / 150 A Starter-Generator mit einem Schnellanschluß-Flansch nach Luftfahrtnorm vorgesehen. Dieses Aggregat hat einen Gewichtsvorteil von ca. 5 kg gegenüber einer konventionellen Trennung von Anlasser und Generator. Da das Bauteil bereits in Hubschrauber-Wellenturbinen verwendet wird besteht eine Luftfahrt-Zulassung.

Im Startfall bei tiefen Temperaturen von -30°C ist mit einer Stromaufnahme von bis zu 400 A kurzzeitig beim Anlaufen zu rechnen. Der Generator erzeugt drehzahlabhängig einen unstabilisierten und ungeglätteten Gleichstrom. Eine Schaltung zu Aufbereitung des Stroms für das Bordnetz ist deshalb nötig und beim Generatorhersteller verfügbar. Die Umschaltung vom Start- auf Generatorbetrieb erfolgt durch ein Schaltschütz.

6.3.5 Zündsystem

Das Zündsystem muß in einem engen Bereich nach dem Beginn der Kraftstoffeinspritzung das Gemisch mit einem Funken entzünden. Da die Einspritzanlage ein weitgehend festes Einspritzende, jedoch einen last- und drehzahlabhängigen Einspritzbeginn aufweist wird eine frei programmierbare, verteilerlose und kennfeldgesteuerte Zündanlage benötigt. Als Eingangssignal stehen der Exzenterwellenwinkel (60 Zähne-Indexrad) und die Last (Potentiometer am Lasthebel der Verteilereinspritzanlage) zur Verfügung. Für die Vorversuche wurde das einstellbare Prüfstandszündsystem benutzt.

Der Funke springt zwischen den Elektroden einer auf dem Markt erhältlichen Spezial-Zündkerze über, die für Motorradmotoren entwickelt wurde.

Das Zündsystem wird motorseitig vollständig montiert. Für die Versorgung der Zündung muß eine Nennspannung von 12V zur Verfügung stehen.

6.3.6 Abgasturboaufladung

Mit den vorausgerechneten Motorschlucklinien wurde nach einem Abgasturbolader (ATL) gesucht, dessen Verdichtercharakteristik harmonisch zum Motor paßt. Der Turbolader muß weiter folgende Eigenschaften aufweisen:

- Turbine mit ausreichender Größe,
- leichtgewichtig,
- integrierte Wastegate-Klappe,
- wassergekühltes Lagergehäuse,
- integriertes Abblaseventil zum Schutz vor Überdrehzahl.

Nach der Überprüfung von Abgasturbolader-Typen verschiedener Hersteller war klar erkenntlich, daß vor allem die Forderung nach geringem Gewicht die Auswahl auf ATL aus japanischer Produktion einschränkt. Zum Zeitpunkt der Marktrecherche konnte ein ATL vom Typ MHI/VOLVO TD04HL-15G als zu den Mustermotoren passend ermittelt werden (siehe Abbildung 6.3.1). Der ATL erfüllt auch die o.g. Forderungen.

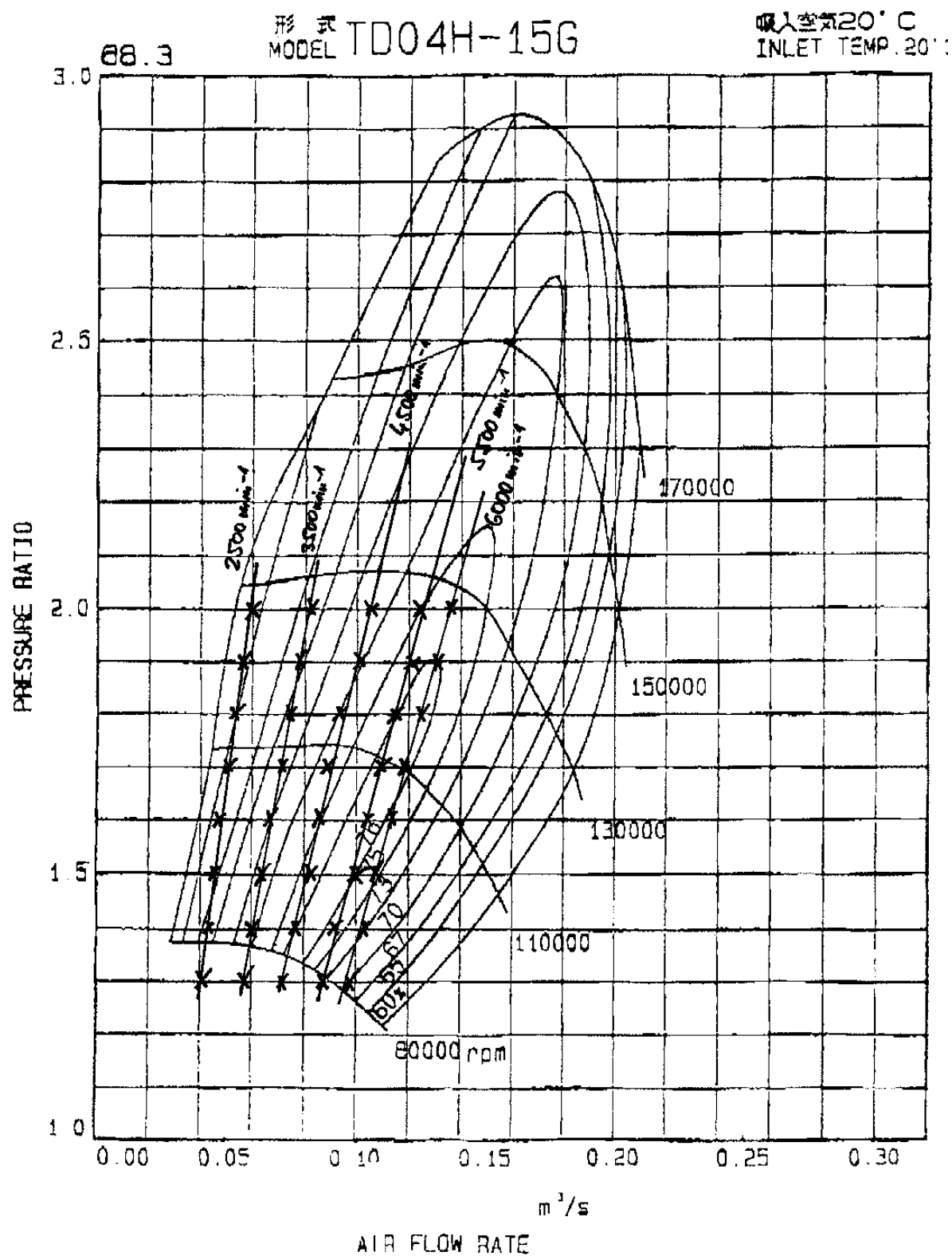


Bild 6.3.1: Verdichterkennfeld des ATL TD04HL-15G

Die Auswahl erfolgte aufgrund von Auslegungsberechnungen im Hause WANDEL ROTARY, nachdem sich KKK aus einer anfänglich geplanten Zusammenarbeit zurückgezogen hatte und kein Ersatz gefunden werden konnte.

6.4 Aufbau der Funktionsmuster (AP 4)

Nach Fertigstellung der konstruktiven Vorgaben und der daraus abgeleiteten Fertigungszeichnungen wurden die Bauteile fast ausschließlich extern gefertigt; über die dabei aufgetretenen Probleme und Schwierigkeiten wird an dieser Stelle nicht weiter berichtet. Parallel zur Fertigung wurde die Beschaffung aller weiteren Teile – Standardteile, Norm- und Kleinteile, etc. – durchgeführt sowie deren Modifikation, sofern erforderlich, noch vorgenommen. Insgesamt wurden drei Teilesätze beschafft und ein Muster komplett aufgebaut. Dieser Musteraufbau ist in den Bildern 6.4.1 bis 6.4.4 dargestellt.

Mit dem Musteraufbau wurden folgende Gewichts/Massenverhältnisse ermittelt:

- Kernmotor, trocken, ohne Peripherie (Generator, ATL, ...): **47 kg**
- Systemaufbau, „ready to fly“, ohne Getriebe und Propeller: **85 kg**
(kann je nach Einbausituation und Ausstattung noch variieren)

Als Besonderheit ist der neu konzipierte Aggregateträger mit Rädergetriebe anzuführen, der in den Bildern 6.4.5 und 6.4.6 zu sehen ist.

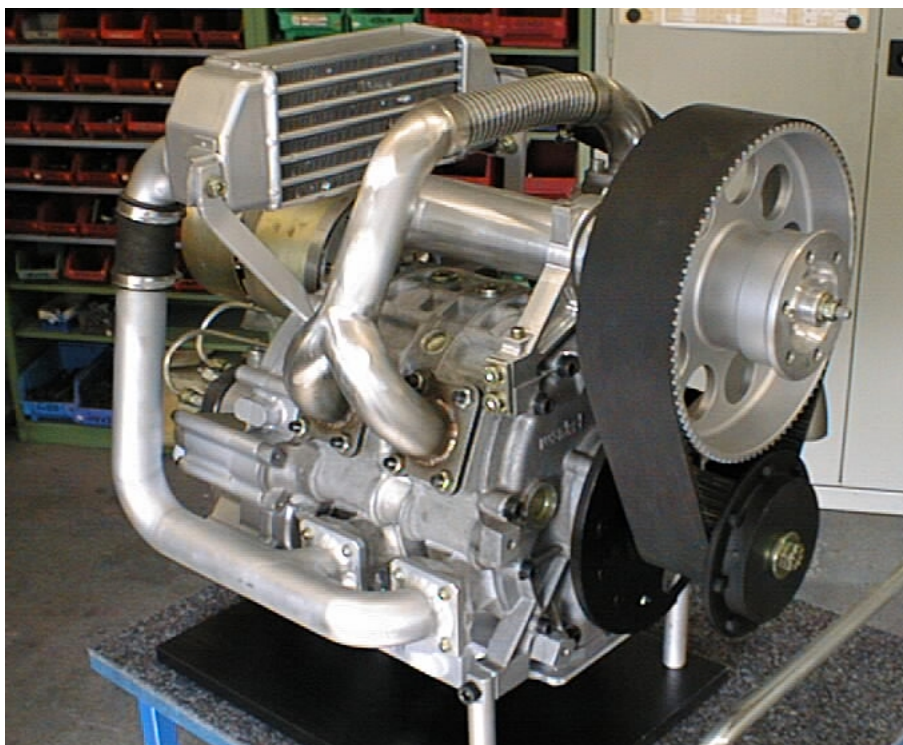


Bild 6.4.1: Musteraufbau LOCOR 814 TDT – Ansicht vorne rechts

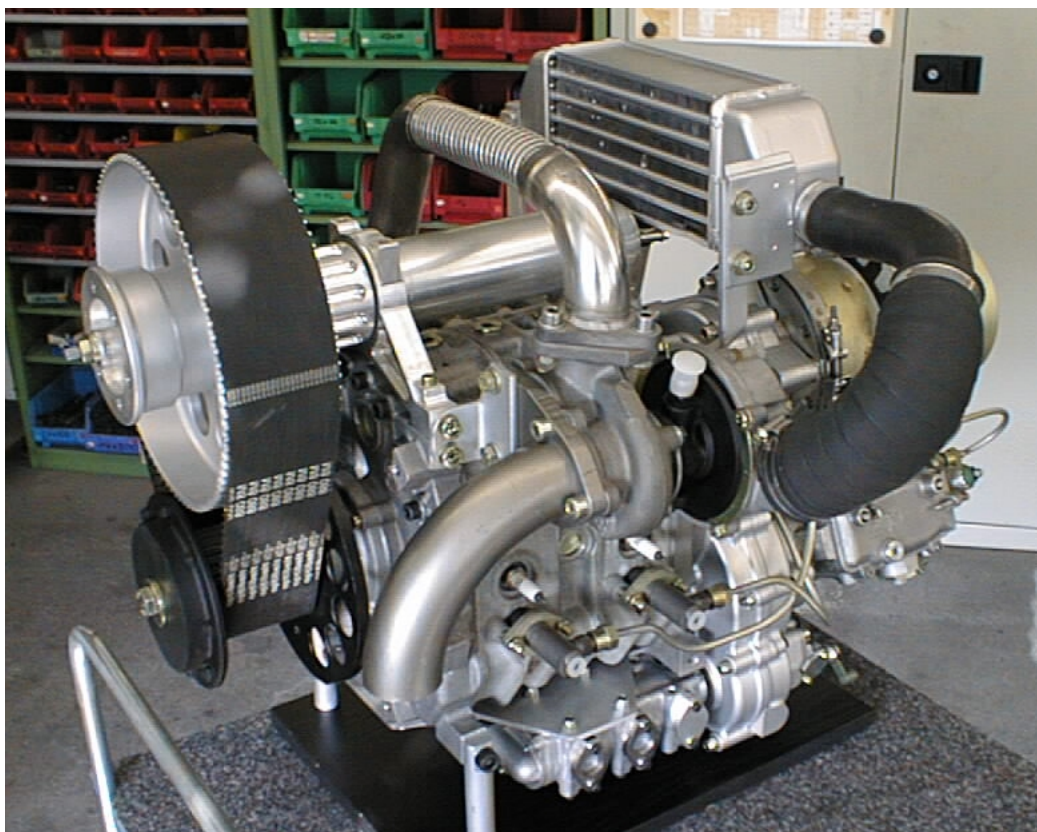


Bild 6.4.2: Musteraufbau LOC R 814 TDT – Ansicht vorne links

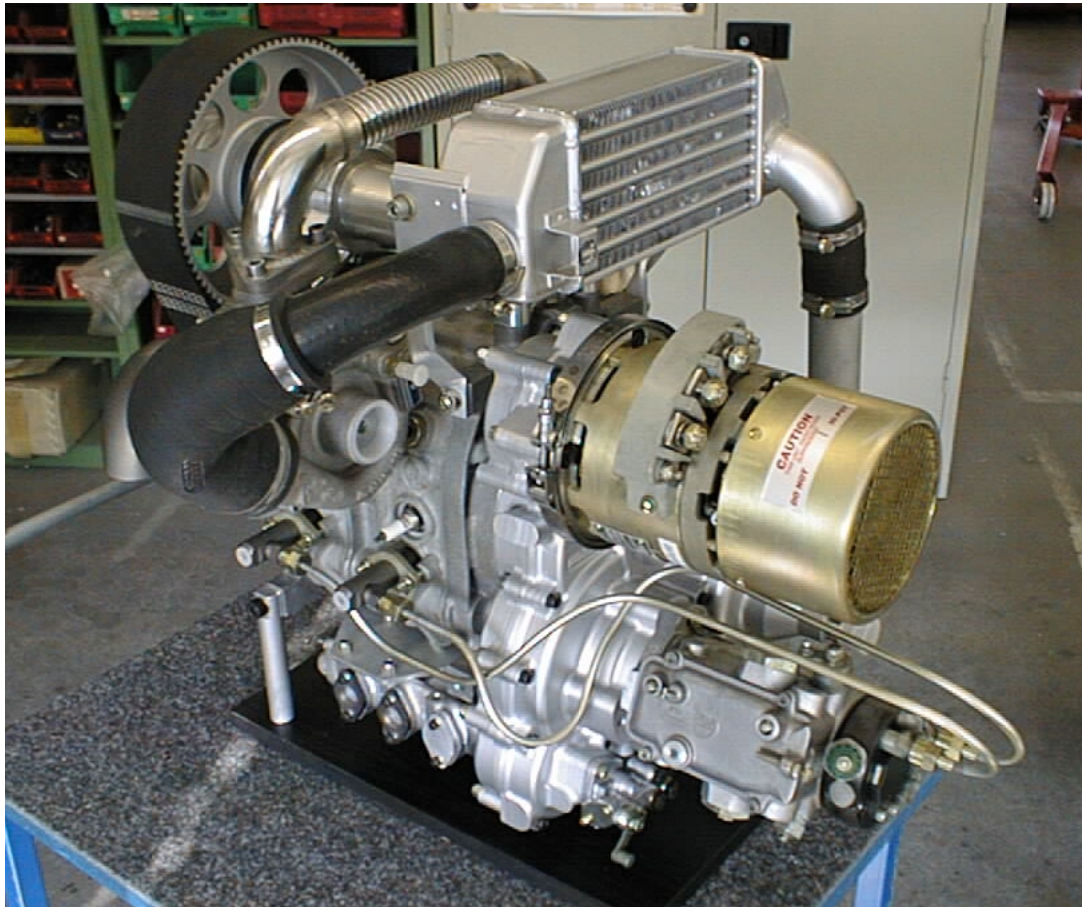


Bild 6.4.3: Musteraufbau LOC R 814 TDT – Ansicht hinten links

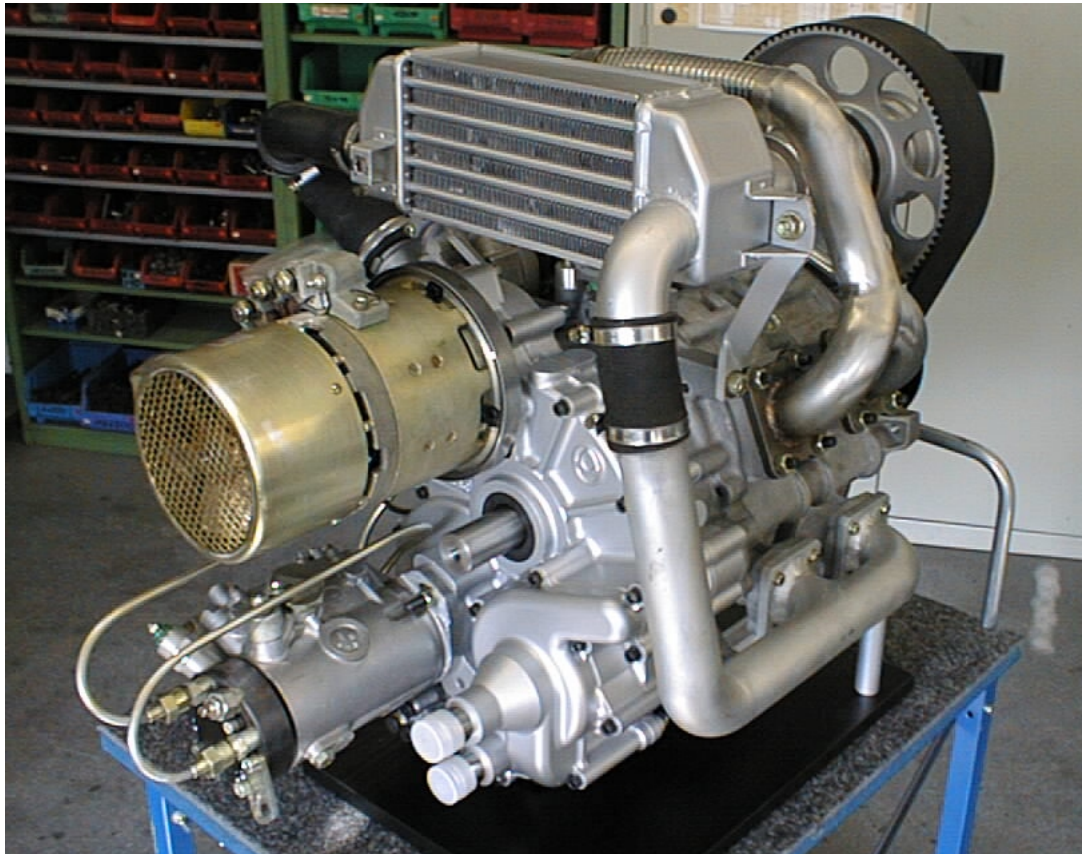


Bild 6.4.4: Musteraufbau LOC R 814 TDT – Ansicht hinten rechts

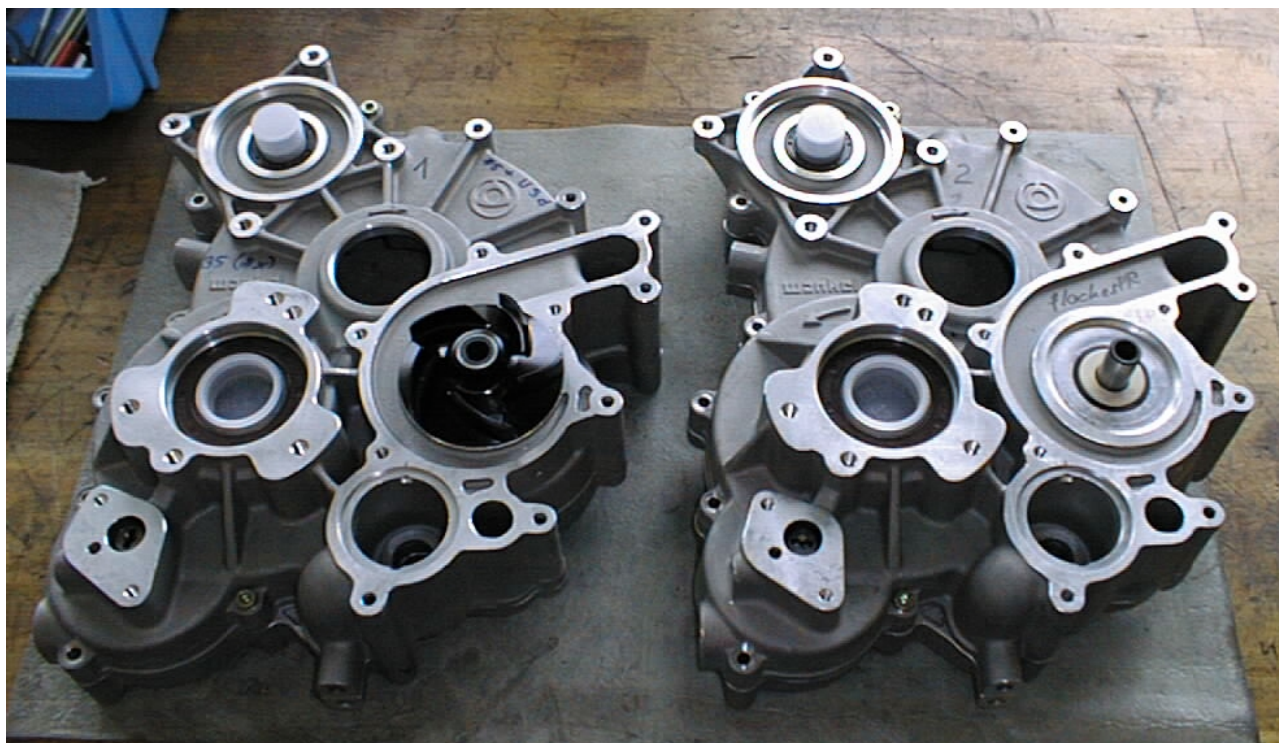


Bild 6.4.5: neuer Aggregateträger LOC 814 TDT – Endseite mit Wasserpumpe

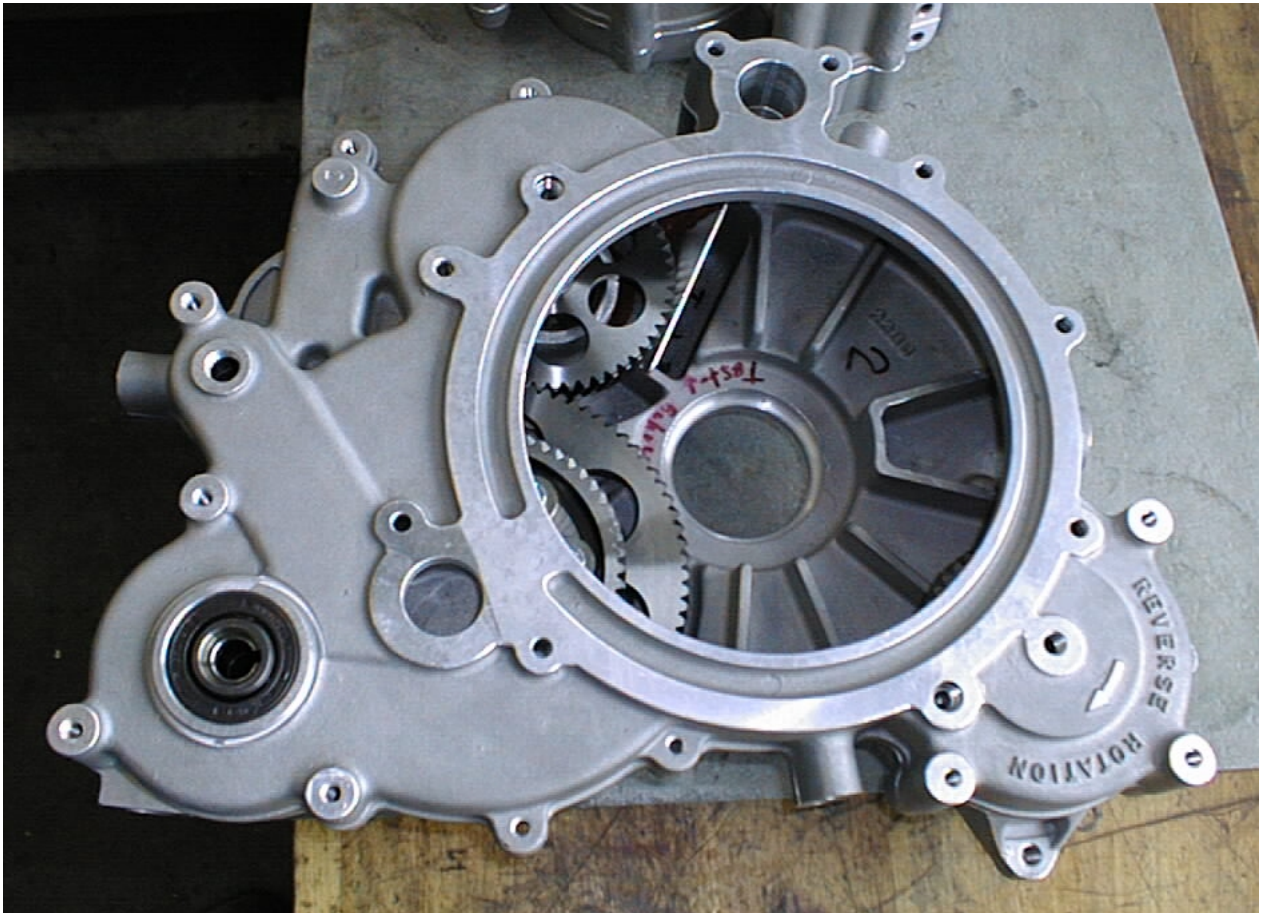


Bild 6.4.6: neuer Aggregateträger LOCR 814 TDT – Motorseite mit Räderwerk

6.5 Betriebsverhaltensuntersuchungen (AP 5)

Die ursprüngliche Planung sah vor, eine Optimierung des Verbrennungsprozesses über Änderung der Einflußgrößen am Gesamtsystem vorzunehmen. Die zu untersuchenden Parameter können auf verschiedene Art klassifiziert werden; eine Möglichkeit besteht darin, zu unterscheiden zwischen

- konstruktiven Größen wie Brennraumgestalt und Anordnung und Gestaltung der zugehörigen Komponenten des Einspritz- und Zündsystems,
- Prozeßsteuerungsgrößen wie Einspritzdruck, -zeitpunkt, -verlauf (-Strategie), Zündzeitpunkt.

Die Voraussetzung hierfür war die Verfügbarkeit der notwendigen Teile, insbesondere eines universell steuerbaren Einspritzsystems. Da es trotz intensiver Bemühungen nicht gelang, ein im finanziellen Rahmen des Projektes vertretbares Common-Rail-Einspritzsystem inkl. der erforderlichen Applikationsunterstützung zu akquirieren (s.a. 6.3), wurde die Vorgehensweise dahingehend geändert, mit vergleichbarem Aufwand Vorversuche an einem 1-Läufer-Versuchsmotor vorzunehmen.

Die konstruktive Gestaltung der Motorteile sollte frühzeitig festgelegt werden, da von der Fertigungsseite (inkl. Modellerstellung) mit entsprechenden Zeiten zu rechnen war. Aus diesem Grund wurden die Erkenntnisse aller bisher untersuchter Varianten zusammengetragen und analysiert.

Bild 6.5.1 zeigt die wesentlichen Möglichkeiten der Positionierung von Einspritzdüse und Zündquelle. Die Basis-LOCER-Konstruktion verwendet Düse vor und Zündkerze im Bereich des Sattels. Wegen des Selbstzündungsverhaltens der verwendeten Kraftstofftypen bei entsprechenden Betriebsbedingungen ist auch nur eine Einspritzung im Bereich kurz vor OT sinnvoll.

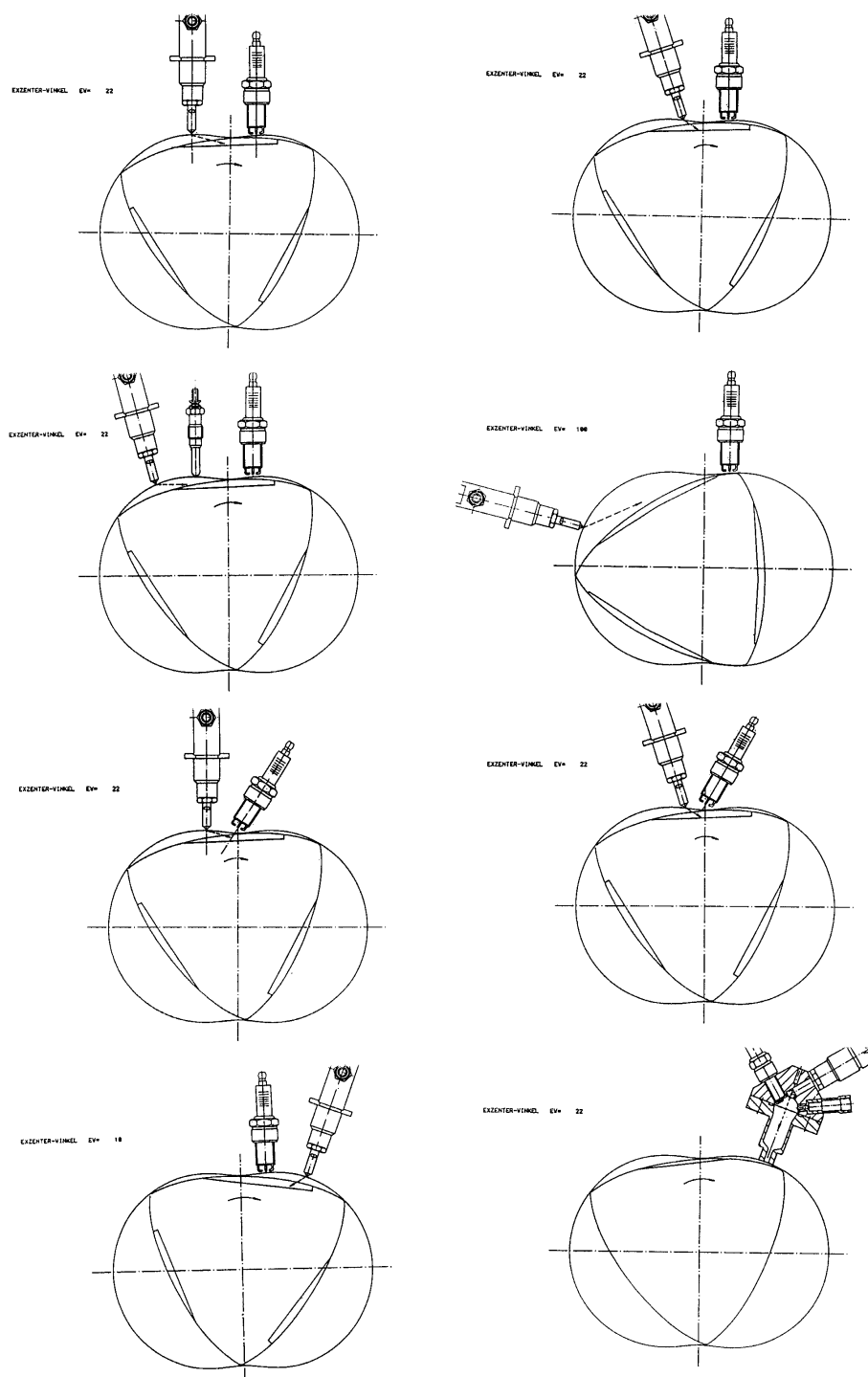


Bild 6.5.1: Anordnungsvarianten Einspritzung/Zündung

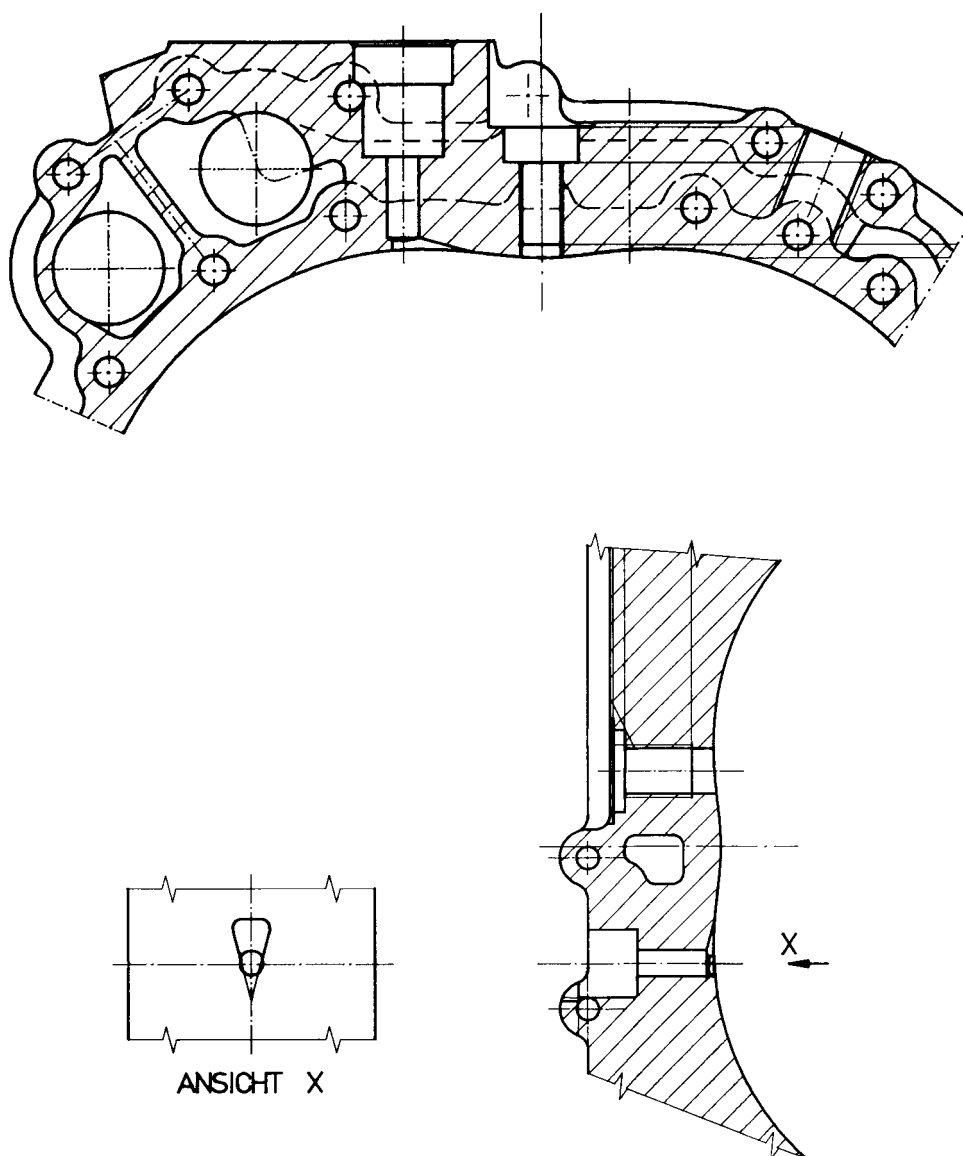


Bild 6.5.2: Basis-LOC-R-Trochoidenvarianten

Von den beiden Varianten in Bild 6.5.2 hat die Variante mit der Zündkerze nach dem Sattel ergeben, daß insbesondere im Leerlauf bis in den Teillastbereich zu starke Ungleichmäßigkeiten im Verbrennungsablauf (quantifizierbar z.B. an der Varianz des Spitzendrucks) auftreten, und zwar unabhängig vom (im Rahmen der Möglichkeit varierten) Einspritzzeitpunkt. Ob dies mit Hilfe einer geänderten Einspritzstrategie kompensierbar ist, konnte wie angegeben nicht untersucht werden.

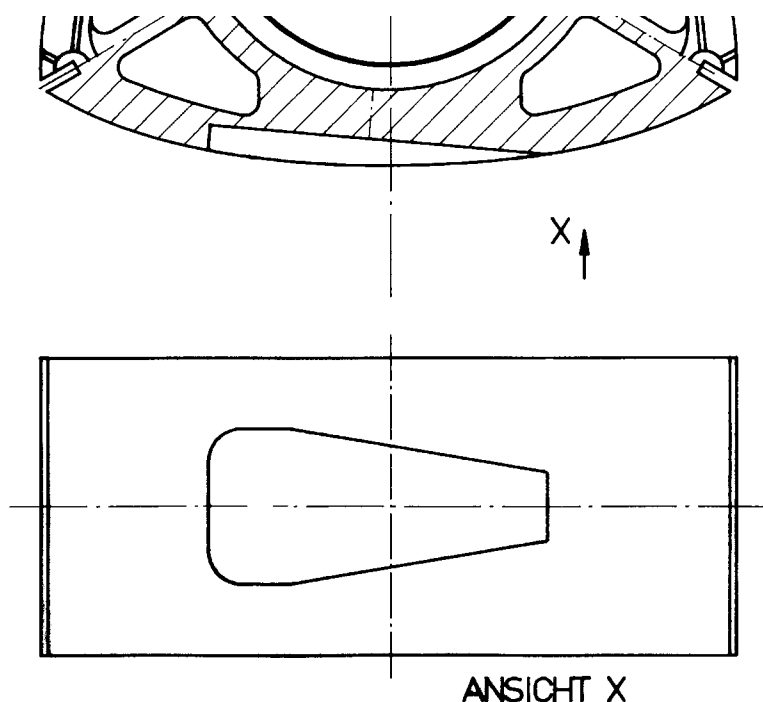


Bild 6.5.3: Basis-LOC-R-Läufermulde

Die Analyse früher durchgeführter Untersuchungen verschiedener Muldenformen ergab, daß die dargestellte Form unter den gegebenen Voraussetzungen schon ein Optimum darstellt und eine weitere Optimierung mit vertretbarem Aufwand nur sinnvoll ist, wenn eine Unterstützung in Form einer theoretischen Voroptimierung auf Basis von Strömungssimulationen gegeben ist.

Dies betrifft auch die Gestaltung der Einspritzdüsen hinsichtlich der Strahlausbreitung. Aus diesem Grund wurde eine Modifikation nur hinsichtlich der Durchmesser der Düsenbohrungen vorgenommen. (Ein Anspritzen der Kolbenflanke hat z.B. in früheren Versuchen keine Verbesserungen gezeigt.)

Es wurden Muster angefertigt mit Spritzloch-Durchmessern zwischen 0,14 und 0,27 mm. Dabei ist die gegenseitige Abhängigkeit von Querschnitt, Druck, Einspritzmenge und -dauer zu beachten; kurze Dauer oder kleiner Querschnitt bedeutet bei gleicher Menge hohen Druck (günstig für Zerstäubung, ungünstig für Pumpenmechanik), ein großer Querschnitt, der bei begrenztem Pumpendruck und hoher Einspritzmenge (aufgeladener Motor) erforderlich ist, ist bei niedriger Last empfindlich gegenüber absoluten Schwankungen in der Einspritzdauer.

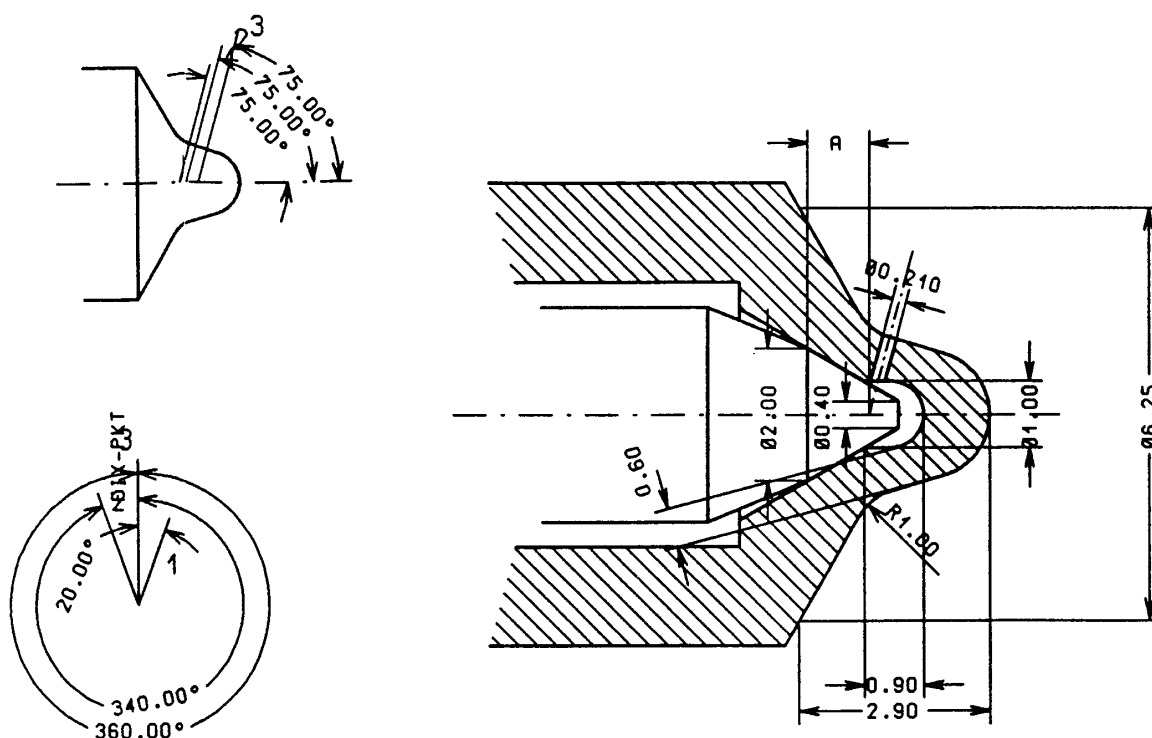


Bild 6.5.4: Basis-LOC-R-Einspritzdüse

Wegen der bisher begrenzten Möglichkeiten der am 1-Läufer-Versuchsmotor vorhandenen Druckerzeugung (mechanische Stempelpumpe, 500(600) bar max.) waren diese Untersuchungen zuerst beschränkt auf Düsen mit 0.18 und 0.21 mm Bohrungen und zwei verschiedene Nockenformen für den Pumpenantrieb. Mit der Verteilereinspritzpumpe konnten dann die Voruntersuchungen fortgesetzt werden, beginnend mit der hydraulischen Abstimmung des Einspritzsystems.

Der Aufwand bei den bisherigen Untersuchungen am 1-Läufer-Versuchsmotor war entsprechend groß, da z.B. zur Variation des Einspritzzeitpunktes der Motor geöffnet und der mechanische Pumpenantrieb verdreht werden muß.

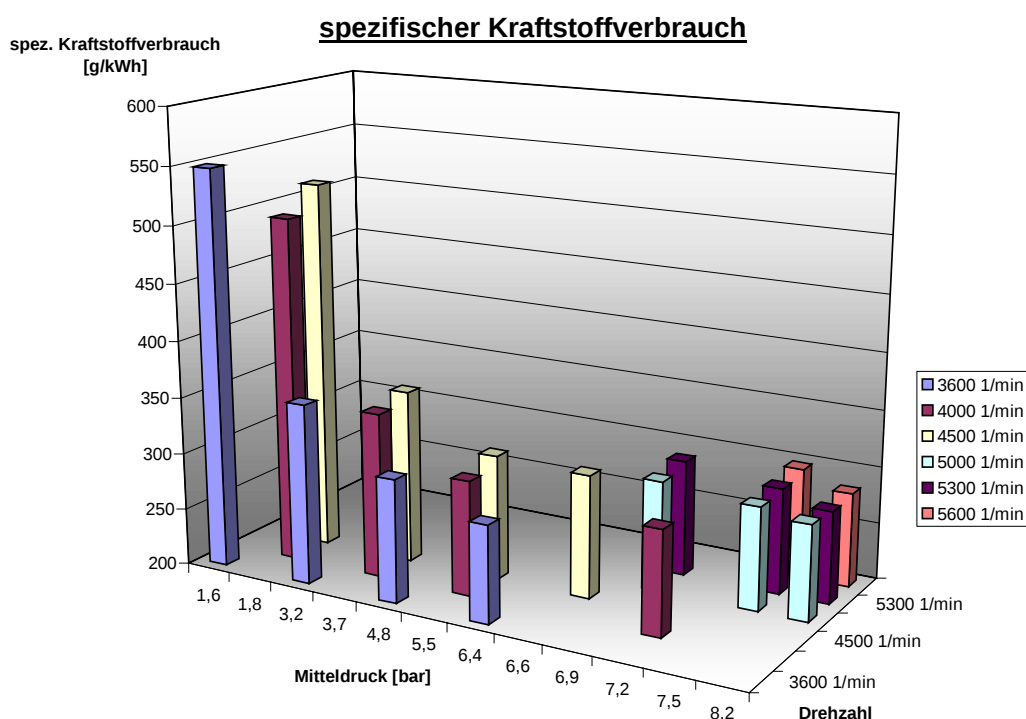
Der Einfluß des Einspritzzeitpunktes auf das Betriebsverhalten kann z.B. wie folgt beschrieben werden: für einen hohen Wirkungsgrad muß der bei der Verbrennung auftretende Spitzendruck nahe nach OT erfolgen. Begrenzt wird dies durch den Druckanstieg und die einhergehende mechanische Belastung. (Die Grenze liegt ungefähr bei einem Winkel von 20° nach OT.) Durch die

festen Konfiguration des Einspritzsystems variiert der Einspritzzeitpunkt mit der Drehzahl und der Last und der Drehzahl, weshalb für gleiche Verhältnisse die Konfiguration geändert werden muß.

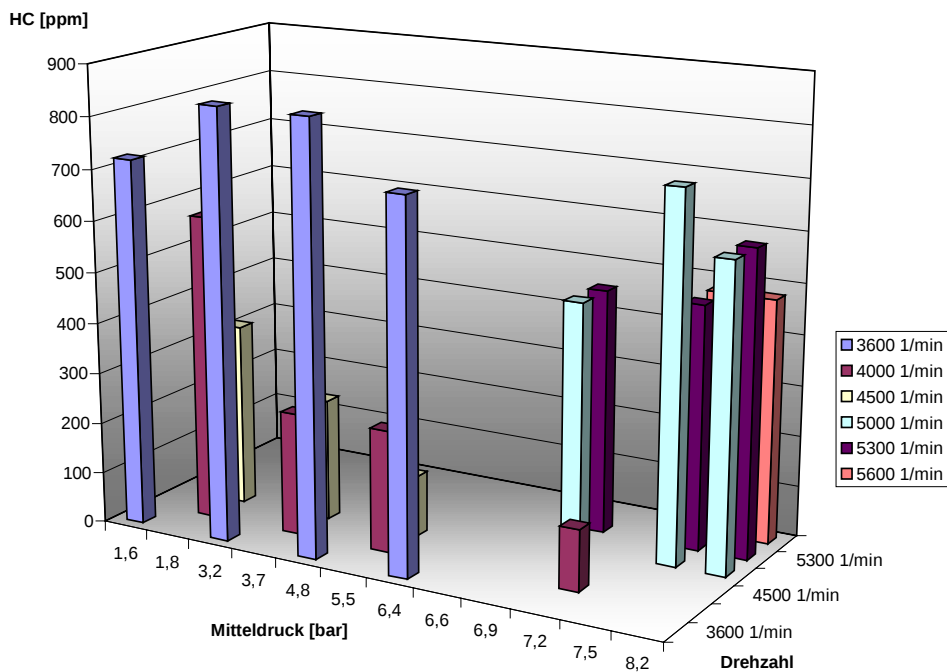
Die im folgenden dargestellten Ergebnisse dieser Art der Vorooptimierung sind direkt auf den LOCR-2-Läufer-Motor übertragbar, da dessen Abgasturbolader näherungsweise ein ähnliches Betriebsverhalten besitzt und das Einspritzsystem sich ähnlich verhält. (S. Bild 6.5.5)

Beim spezifischen Kraftstoffverbrauch konnten Bestwerte zwischen 260 und 270 g/kWh erzielt werden, wobei diese Werte weitgehend unter Reiseflugbedingungen vorliegen, d.h. dort, wo der Antrieb überwiegend betrieben wird. Dies liegt zwar deutlich über den von optimierten Selbstzünderdieselmotoren erreichten Werten, im Vergleich zu den heute eingesetzten Flugtriebwerken ist aber ein ebenso deutlicher Gewinn zu verzeichnen. Weitere Optimierungen lassen ein Verbesserungspotential von ca. mindestens 5 bis 10 % erwarten.

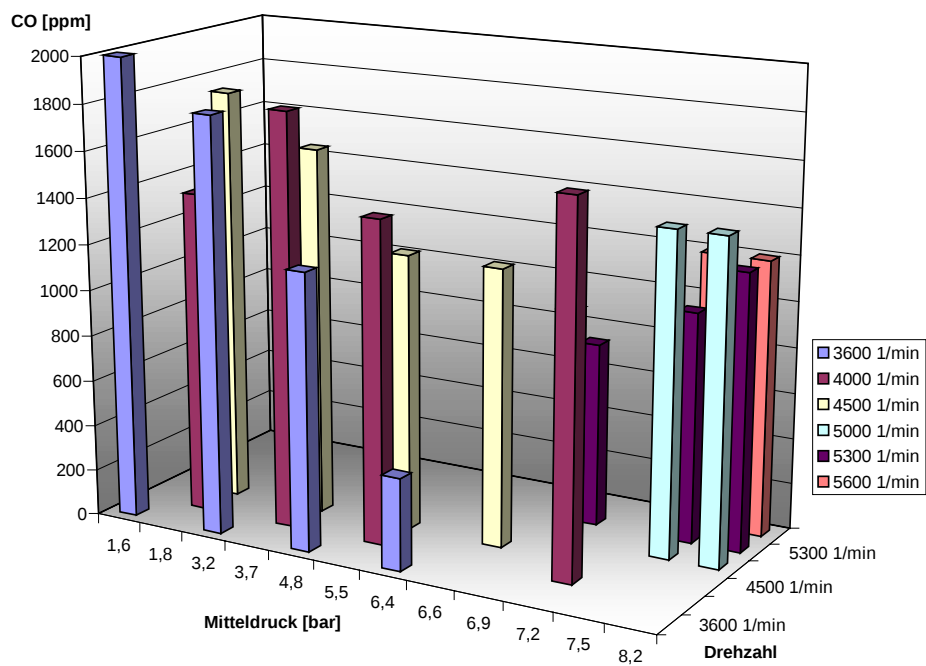
Die Emission von unverbrannten Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxid liegt im üblichen Bereich und kann durch einfache Maßnahmen der Nachverbrennung (auch ohne Katalysator) reduziert werden.



Kohlenwasserstoff-Emission



Kohlenmonoxid-Emission



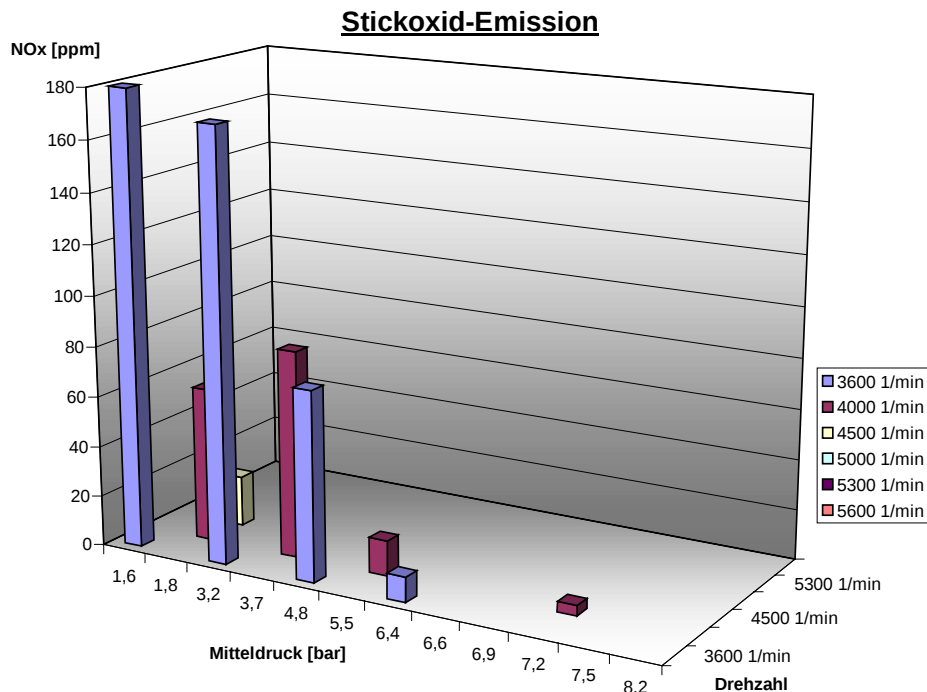


Bild 6.5.5: Kennfelder 1-Läufer-Versuchsmotor mit Abgasturboaufladung und mechanischer Hochdruckeinspritzung (Voroptimiert durch verschiedene Konfigurationen)

Von besonderer Bedeutung ist die im interessierenden Betriebsbereich niedrige Stickoxidemission, basierend auf dem besonderen Brennverfahren, da eine katalytische Nachbehandlung für diesen Schadstofftyp heute noch recht aufwendig ist.

Welches weitere Optimierungspotential noch vorhanden ist, läßt sich allenfalls abschätzen. Neben der Vereinfachung in der hier angewandten rein empirischen Vorgehensweise durch leichter veränderbare Parameter (CR-Einspritzung) wäre es für künftige Untersuchungen wünschenswert, Möglichkeiten wie Verbrennungsbeobachtung (Glasmotor) und -berechnung(Simulation) nutzen zu können, was im Rahmen dieses Projektes leider nicht realisiert werden konnte.

Bei den Prüfstandsläufen konnte schon unter 6000/min ein Mitteldruck von 9 bar gefahren werden, so daß die angestrebte **Nennleistung** von **70 kW** schon für den Drehzahlbereich von 5500 bis 5750/min angegeben werden kann.

6.6 Dauerlaufuntersuchungen (AP 6)

Mitentscheidend für den Einsatz eines Antriebssystems im Luftfahrtbereich ist dessen Zuverlässigkeit. Der Nachweis der Zuverlässigkeit kann zum einen theoretisch/rechnerisch, zum anderen praktisch/experimentell erfolgen.

Beide Methoden sind in den Vorschriften für die Zulassung von Luftfahrtgeräten, hier im besonderen für Flugmotoren, niedergelegt, d.h. in Europa durch die JAR (Joint Aviation Regulations) und in USA durch die FAR (Federal A.R.), und zwar in den Abschnitten JAR-E (engines) bzw. FAR/Part 33. Von besonderer Bedeutung sind hier die sogenannten Bauvorschriften, welche Vorgaben konstruktiv bzw. konfigurativ (z.B. durch Redundanz) zu erfüllen sind, und die Dauerlauftests, die vom entwickelten ‚Muster‘ zu absolvieren sind.

Für eine spätere erste Flugerprobung ist aufgrund der neuen Technik deshalb vorgesehen, mit einer Doppelmotor-Konfiguration (WANKEL-TWINPACK) zu beginnen, um 50% Leistung als Fail-Safe zur Verfügung zu haben. Deshalb wurden in diesem Vorhaben insgesamt drei Einzelmotoren vorgesehen.

Für Kolbenmotoren wird ein 150-h-Zyklustest vorgegeben, der die typische Anforderung in der Anwendung wiedergeben soll, nämlich kurzer Anteil für Maximalleistung (Start), mittlerer Anteil für Nennleistung (Steigflug) und überwiegender Anteil für obere Teillast, d.h. 50-75% Nennleistung (Reiseflug).

Dies stellt ein geeignetes Hilfsmittel dar, da damit das Gesamtsystem im Zusammenspiel aller Komponenten bewertet werden kann, was in Einzeltests nur mit genäherten Annahmen möglich ist, weil die Wechselwirkung in vielen Fällen in der Theorie nicht exakt modellierbar ist.

Ein entsprechender Test mit dem WANKEL-Kerosin-Flugmotor in der Endkonfiguration war ursprünglich geplant, konnte jedoch innerhalb des Vorhabenszeitraumes nicht mehr durchgeführt werden. Aus diesem Grund wurden Untersuchungen zu kritisch erscheinenden Komponenten im Vorfeld in der 1-Läufer-Versuchsmotor-Konfiguration durchgeführt, wobei versucht wurde, dies in

Kombination mit den Betriebsverhaltensuntersuchungen zu kombinieren. Dies bedeutet, daß überwiegend unter nicht- bzw. suboptimalen Bedingungen getestet wurde. Dieser Umstand ist aber insgesamt eher als höhere Belastung zu werten. Insgesamt wurden mit zwei Aufbauten je mindestens 150 h im Zyklus absolviert.

Zu den hochbelasteten Teilen, bzw. den Teilen, die einer Verschleißbelastung unterworfen sind, zählen

- Brennraum bildende Gehäuseteile,
- Kolbenläufer (Rotor),
- Gasdichtteile und zugehörige Gehäuseoberflächen,
- Dichtungen des Schmierölkreislaufs,
- Dichtungen des Kühlwasserkreislaufs,
- relevante Komponenten der Hochdruckeinspritzung und Zündung,
- Lager

als unkritisch, da in vergleichbarer Anwendung bewährt, können die Komponenten wie Standardlager und -dichtungen gelten, da sie entsprechend den Einsatzbedingungen dimensioniert wurden.

Soweit möglich, wurden theoretische Voruntersuchungen durchgeführt (FEM-Analysen zu Läufer und Gehäuse, siehe 6.2) und bereits bekannte Untersuchungsergebnisse zusammengetragen und analysiert. Darauf aufbauend bzw. soweit übertragbar erfolgt(Konstruktion, Umsetzung und Erprobung.

6.6.1 Kolbenläufer

Der Läufer unterliegt einer höherfrequenten mechanischen und einer niederfrequenten thermischen Wechselbelastung. Die Temperaturbelastung wird durch die Kolbenkühlung reduziert, welche in der vorliegenden Ausführung in Form einer Ölkühlung realisiert wurde, ähnlich der Kolbenkühlung beim Hubkolbenmotor. Das Öl wird durch die Taumelbewegung des Läufers zum Lagerbereich geschleudert, dort gesammelt und durch Kanäle in den Seitenscheiben abgeführt.

Dieses in der Vergangenheit bewährte Prinzip, bedurfte einer Abstimmung auf die vorhandenen Verhältnisse, da die Kühlung durch die Wärmeabfuhr auch einen negativen Effekt auf den thermischen Prozeß hat.

Aus früheren Versuchen bei WANKEL ist bekannt, daß bei nicht ausreichender Standfestigkeit ein Versagen bei einer Betriebsdauer im Zyklus meist in den ersten Stunden erfolgt. Ausgehend von einer Dauerhaltbarkeit bei ca. 10^6 Lastspielen bedeutet dies eine Betriebsdauer von ca. 10 h bei ca. 5000 U/min Exzenterwelle, entsprechend $5000:3 = 1667$ U/min am Läufer.

Aus diesem Grund werden zur Beurteilung Zyklenläufe von jeweils 20 h gefahren. Die Beurteilung, ob die Kühlung noch ausreichend ist und weiter reduziert werden konnte, erfolgte anhand der Ölkohlebildung im Läuferinneren.

Die anfangs in der Exzenterwelle vorhandene zusätzliche Spritzöffnung wurde schrittweise verkleinert. Die Öffnung konnte trotz der erhöhten Belastung durch den aufgeladenen Betrieb mit Abgasturbolader sogar ganz geschlossen werden, ohne daß in den Versuchen ein Schaden auftrat. Zur Kühlung reicht demnach das aus den Hauptlagern der Exzenterwelle und dem Kolbenlager austretende Fluchtöl aus. In der Ausgangskonfiguration, zuviel Kühllöl, war ein im Mittel um ca. 10 bis 15% höherer Wärmeeintrag in das Kühllöl festzustellen.

Der Verbund Kolbenläufer/Hohlrad mit Steuerverzahnung – geteilte Konstruktion, die in einigen Punkten gegenüber einer einteiligen Version (siehe 6.2.3) Vorteile bietet - hat im Zyklusbetrieb standgehalten.

6.6.2 Trochoide (Neukonstruktion)

Die im Zyklusbetrieb gefahrenen Trochoiden (Neukonstruktion) zeigten in der Grundkonstruktion keine Ausfallerscheinungen.

Die visuelle Beurteilung (Oberflächenaussehen, Ablagerungen) zeigte, daß hinsichtlich konstruktiver Gestaltung, insbesondere Kühlkanalführung, an einigen Stellen noch Detailoptimierungen durchgeführt werden können.

6.6.3 Seitenscheiben (Neukonstruktion)

Auch hier traten keine Ausfälle der Grundkonstruktion, auch nicht im kritischen Bereich des Verbundes mit dem Ritzel Steuerverzahnung / Lagerträger, auf.

6.6.4 Laufpartner Gasdichtteile/Oberflächenbeschichtung

Landläufig wird das Gasdichtsystem beim Kreiskolbenmotor als Schwachpunkt angesehen - fälschlicherweise. Bei sachgerechter konstruktiver Ausführung, Materialwahl und richtiger Einsatzbedingung (Schmierung) sind die an das System gestellten Forderungen hinsichtlich Zuverlässigkeit und Langlebigkeit erfüllbar, was sich bei späteren Serienprodukten ausgiebig gezeigt hat, z.B. Laufzeiten > 200000 km in automobilen Anwendungen.

Die anfänglichen Ausfallerscheinungen im Laufe der KKM-Entwicklung führten bei der beteiligten Industrie zu einer intensiver Beschäftigung mit dieser Problematik, wobei unzählige Untersuchungen sowohl in Modellversuchen als auch direkt in der laufenden Anwendung durchgeführt wurden. Die aus diesen Untersuchungen bekannten Ergebnisse wurden vor Festlegung der weiteren Vorgehensweise eingehend studiert und analysiert.

Zusammenfassend lassen sich folgende Feststellungen treffen:

- Es gibt kein ideales Dichtteilematerial; entscheidend ist die Werkstoffpaarung beider Reibpartner. Eine Dichtung, die auf einer Beschichtung hervorragend läuft, kann auf einer anderen Oberfläche schon nach kürzester Laufzeit zum Versagen führen.
- Es gibt bezüglich der physikalischen Eigenschaften keine generelle Aussagen ‚hart auf hart‘, ‚weich auf weich‘ oder ‚hart auf weich‘ bzw. umgekehrt.
- Ein wesentlicher Einfluß spielt das dritte Element im tribologischen System, nämlich das Schmiermittel und dessen Ausbildung, was wiederum stark von den Einsatzbedingungen abhängt. Dabei ist zu unterscheiden, ob Temperaturgrenzen des Schmiermittels (in Verbindung mit aus der Verbrennung stammenden Reaktionsprodukten) überschritten werden, ob eine dann mögliche Schmierstoffverdampfung eventuell noch ausreichende Kühlung liefert, ob die

entsprechend der Viskosität erforderliche Schmierstoffdicke nicht erreicht und damit Wechseldeformationen verursacht werden.

- Alle bekannten früheren Untersuchungen beziehen sich auf Benzinmotoren. Der festgestellte höhere Verschleiß des Kreiskolbenmotors im Kaltbetrieb gegenüber dem Hubkolbenmotor rührt von der verdünnenden Wirkung des im kalten Bereich sich an die Wand anlagernden Kraftstoffs her. (Aus diesem Grund verhielt sich der von Daimler-Benz entwickelte Wankelmotor mit Benzin-Direkteinspritzung in dieser Hinsicht kritischer als alle mit externer Gemischbildung und homogener Brennraumfüllung.)
- Als hauptsächliche Lösungen, welche in Anwendungen auch unter ökonomischen Gesichtspunkten zum Einsatz kamen, sind zu nennen: Gehäusebeschichtungen: elektrochemisch aufgebracht Chrom, Nickel-Siliziumkarbid-Dispersionsschicht (galvanisch), Molybdän- und Sonderbronzeschichten sowie nitrierter Grauguß. Dichtleistenmaterial: martensitisch ausgebildetes Gußmaterial, teilweise auch oberflächengehärtet oder verdichtet, Hart- bzw. Sintermetall wie Ferrotic (Sinterprodukt aus Eisen Titankarbid), Keramik wie Siliziumnitrid, z.B. heißgepreßt und/oder faserverstärkt, für Sonderanwendungen auch ‚Kohle‘.

Ausgehend von der vorhandenen Konstruktion, auf die aufgebaut werden sollte, und im finanziellen Rahmen dieses Projektes war es nicht möglich, umfangreichere tribologische Untersuchungen durchzuführen. Entscheidend für die Auswahl waren folgende Überlegungen:

- Bei dem vorliegenden Motorkonzept handelt es sich um einen Schichtlademotor mit Hochdruckeinspritzung im heißen Bereich. Erfahrungen aus dem ottomotorischen Betrieb lassen sich nur bedingt übertragen. Der Kaltverschleiß spielt in der Fluganwendung eine geringere Rolle als im Automobilbereich (Kurzstreckenbetrieb). Außerdem wird durch die Flüssigkeitskühlung ein konstantes Temperaturniveau gehalten.

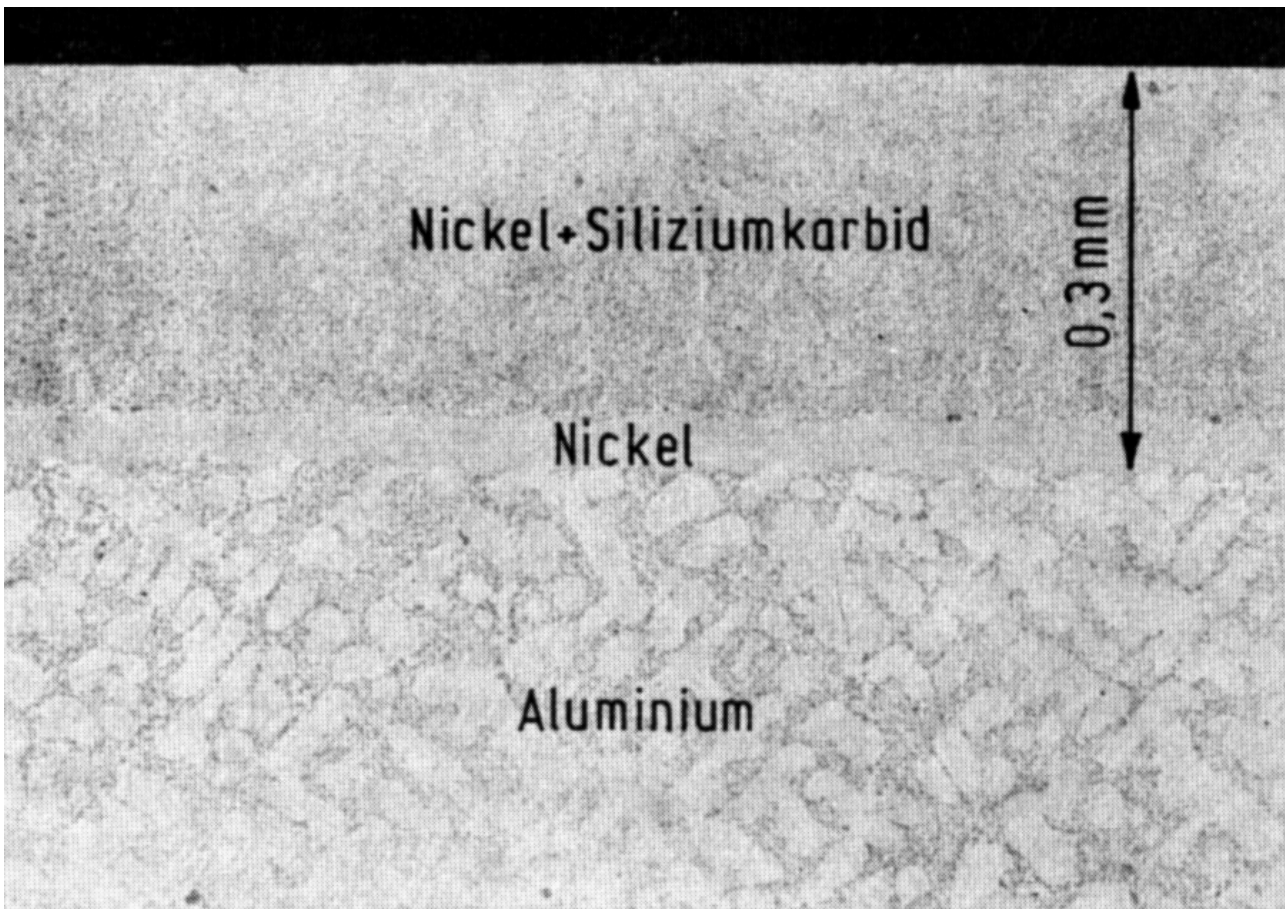


Bild 6.6.1: Schliff durch ein mit Ni-SiC beschichtetes Aluminiumbauteil

- Als Trochoidenbeschichtung soll die Ni-SiC-Dispersion beibehalten werden, da diese sich auf dem Aluminium-Grundmaterial des Gehäuses bisher bestens bewährt hat. Sie erlaubt nicht nur ein breites Spektrum an Laufpartnern, sondern haftet auch sehr gut - selbst bei Verformung des Grundwerkstoffes -, das Verschleißverhalten ist gewöhnlich degressiv (siehe Bild 6.6.1).
- Als Referenz wurden für die Radialdichtleisten die Standardleisten aus Gußmaterial (Götze IKA S-9) herangezogen, die bisher schon im niedriger belasteten Wankel-Saugdiesel zum Einsatz kamen.
- Alternativ wurden Keramikleisten aus SiN-AlO getestet, da diese verfügbar sind und neben geringem Verschleiß auch eine positive Wirkung hinsichtlich sonstigem Betriebsverhalten (z.B. Reibung, geringer Schmierölbedarf) erwarten lassen.

- Von Radialleisten aus Hartmetall wurde abgesehen, da diese nachteilig im Hinblick auf Verfügbarkeit und Gewicht sind.
- Für die Dichtteile zu den Gehäuseseitenteilen wurden nur solche aus Standard-(Kolbenring-Guß)-Material verwendet, da sich diese in allen bisherigen Anwendungen als unkritisch erwiesen haben.
- Für die Beschichtung der Gehäuseseitenteile wurde eine Molybdänschicht gewählt. Alternativ zum Plasmaspritzen als Beschichtungsverfahren wurde ein sogenanntes Jet-Spray-Verfahren getestet, da dieses eine fertigungstechnische Vereinfachung darstellt.
- Bezüglich des Schmierölverbrauchs ist ein Kompromiß zu schließen. Grundsätzlich wird bei Hubkolbenmotoren im Luftfahrtbereich ein höherer Ölverbrauch zugelassen als im automobilen Bereich. Dabei ist zu bedenken, daß das Schmieröl mit dem Abgas den Motor verläßt und zur Schadstoffemission beiträgt. Der Wankelmotor bietet dabei jedoch den Vorteil, daß im Abgastrakt keine Leerzyklen auftreten und dieser damit auf hohem Temperaturniveau gehalten wird, was zu einer guten Nachverbrennung noch vorhandener Kohlenwasserstoffe führt. Ein Mitverbrennen des Öls hat zwar auch den Nachteil, daß regelmäßig das verbrauchte Öl nachgefüllt werden muß, aber bei entsprechender Wartungsstrategie kein Ölwechsel mehr anfällt und die Ölqualität ständig auf gutem Niveau liegt. Ein sinnvoller Zielwert für den spezifischen Ölverbrauch liegt bei etwa 2 g/kWh, was auch erreicht werden konnte.

Mit diesen Vorgaben wurden die Dauerlaufversuche begonnen. Gegenüber dem Verschleiß der Standard-Radialdichtleisten im Wankel-Vielstoffmotor ohne Turboaufladung von $< 1 \mu\text{m/h}$, trat im aufgeladenen Betrieb mit im Mittel ca. 1.6-facher Last und 1.5-facher Drehzahl bereits nach ca. 70 h ein Leistungsabfall auf. Nach Demontage des Motors zeigte sich folgendes Bild:

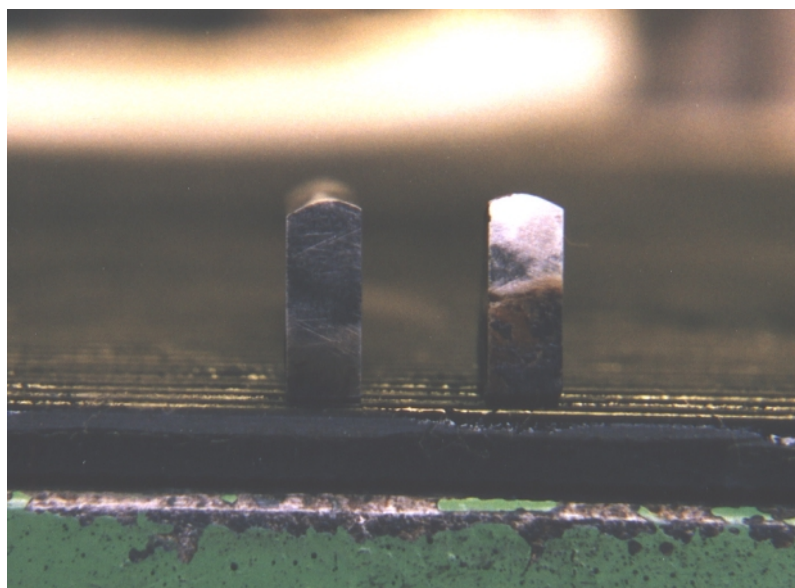


Bild 6.6.2: Dachphasenbildung bei Radialdichtleisten

Die zweigeteilten Radialdichtleisten zeigten im Profil die typische Dachphasenbildung (s. Bild 6.6.2), die dadurch entsteht, daß nur in einem bestimmten Bereich der Kolbenbewegung und damit des Schwenkwinkels der Dichtleiste ein hoher Gasdruck auftritt, der die Leisten gegen die Laufbahn preßt.

Der über die Länge der Leiste unterschiedlich starke Verschleiß, der zur Teilung hin zunimmt, zeigt, daß sich durch die im Betrieb aufgrund der Temperatur einstellende Ausdehnung der Leiste im Vergleich zum Gehäuse ein nicht optimales Tragbild, d.h. gleichmäßige Verteilung auf langen Teil und Dreiecksteil der Dichtleiste, einstellt. Dies ist auch auf der Gegenseite, der Trochoidenlaufbahn zu erkennen.

Der Schmierfilm reichte somit offensichtlich für die unter den genannten Bedingungen getestete Materialpaarung nicht aus. Die Mangelschmierung führte zu einem entsprechenden Abtrag, der an der Riefenbildung auf der Dichtleistenkuppe deutlich zu erkennen ist.

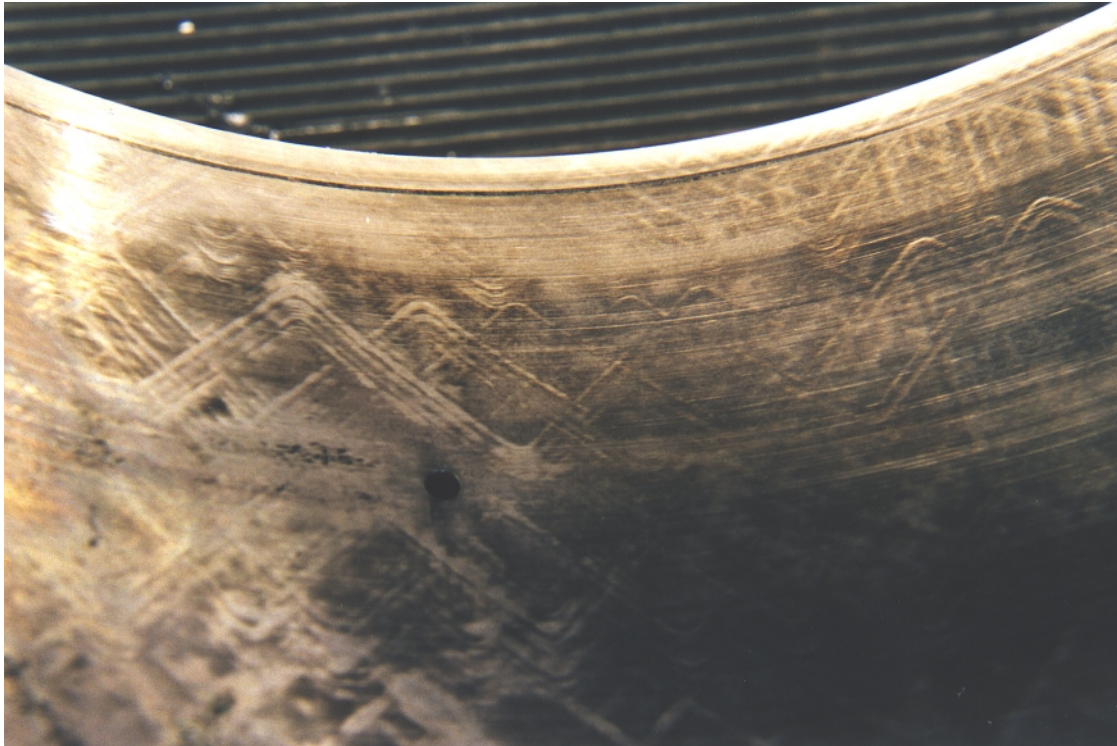


Bild 6.6.3: Tragbild auf der Trochoidenlaufbahn

Positiv ist bei diesem Verhalten, daß die Trochoidenlaufbahn keinem nennenswerten Verschleiß unterliegt, was anhand der noch vorhandenen Oberflächenstruktur, die in der Fertigung beim Schleifen entstanden ist, festgestellt werden konnte.

An den seitlichen Dichtteilen war wie erwartet ebenfalls kein nennenswerter Verschleiß festzustellen. Dies kann dadurch erklärt werden, daß im Bereich hoher Drücke die Bewegung mehr in Richtung der Seitendichtleistenstreckung erfolgt, wodurch offensichtlich der Schmierfilm nicht so schnell versagt. Aus vorangegangenen Langzeit-Untersuchungen ergab sich eine Verschleißrate beim Wankel-Vielstoffmotor ohne Turboaufladung, die bei ca. $0.1 \mu\text{m/h}$ liegt, also bei ca. 10% der Radialdichtleisten. Die Druckbelastung auf die Seitenscheibenbeschichtung ist durch diese messerartige Bewegung höher und führt zu der bekannten Stufenbildung in der Oberfläche, deren Ausbildung stark degressiv ist, was eher auf einen Verdichtungseffekt schließen läßt.

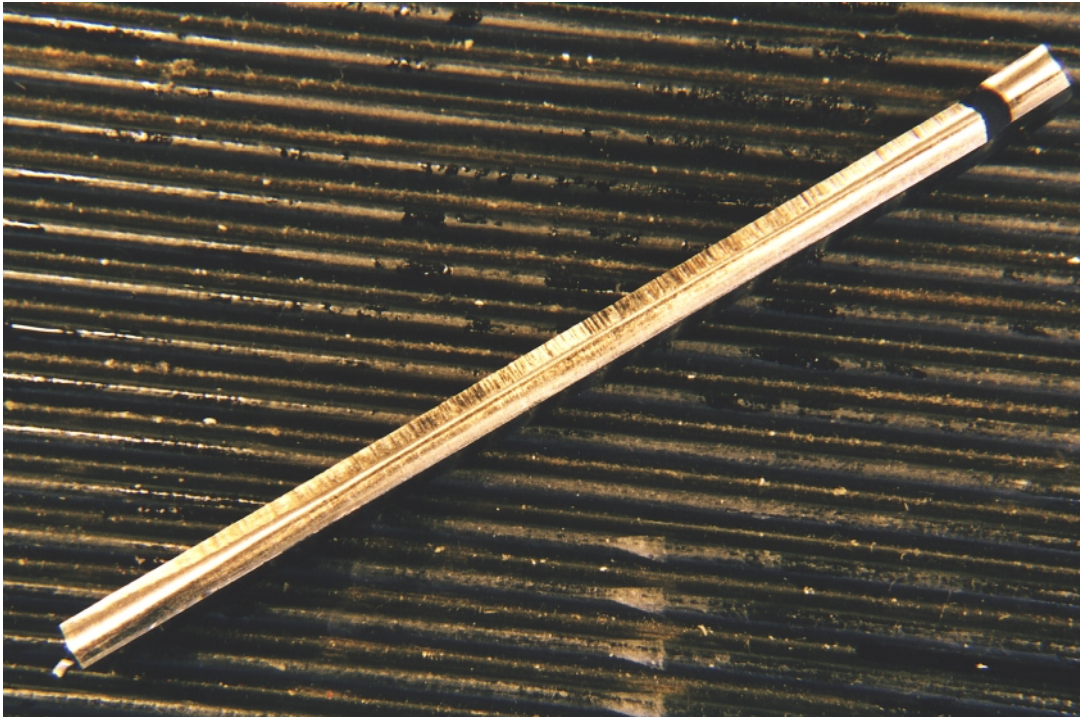


Bild 6.6.4: Radialdichtleiste mit Riefenbildung auf der Kuppe

Auf eine stufenweise Erhöhung der Schmierstoffzugabe, um festzustellen, wo der Übergang in den flachen Teil der Verschleißkurve (Verschleiß in Abhängigkeit der Schmierölmenge) stattfindet, wurde zu Gunsten der Erprobung des alternativen Dichtleistenmaterials verzichtet.

Dauerlaufversuche mit Radialdichtleisten aus Siliziumnitrid wurden in begrenztem Umfang durchgeführt. Innerhalb eines Zyklus konnte noch kein nennenswerter Verschleiß gemessen werden, was als Basis für eine 150 h Freigabe dienen kann. Hinsichtlich der angestrebten TBO (2000 h) müßten aber noch weitergehende Versuche absolviert werden.

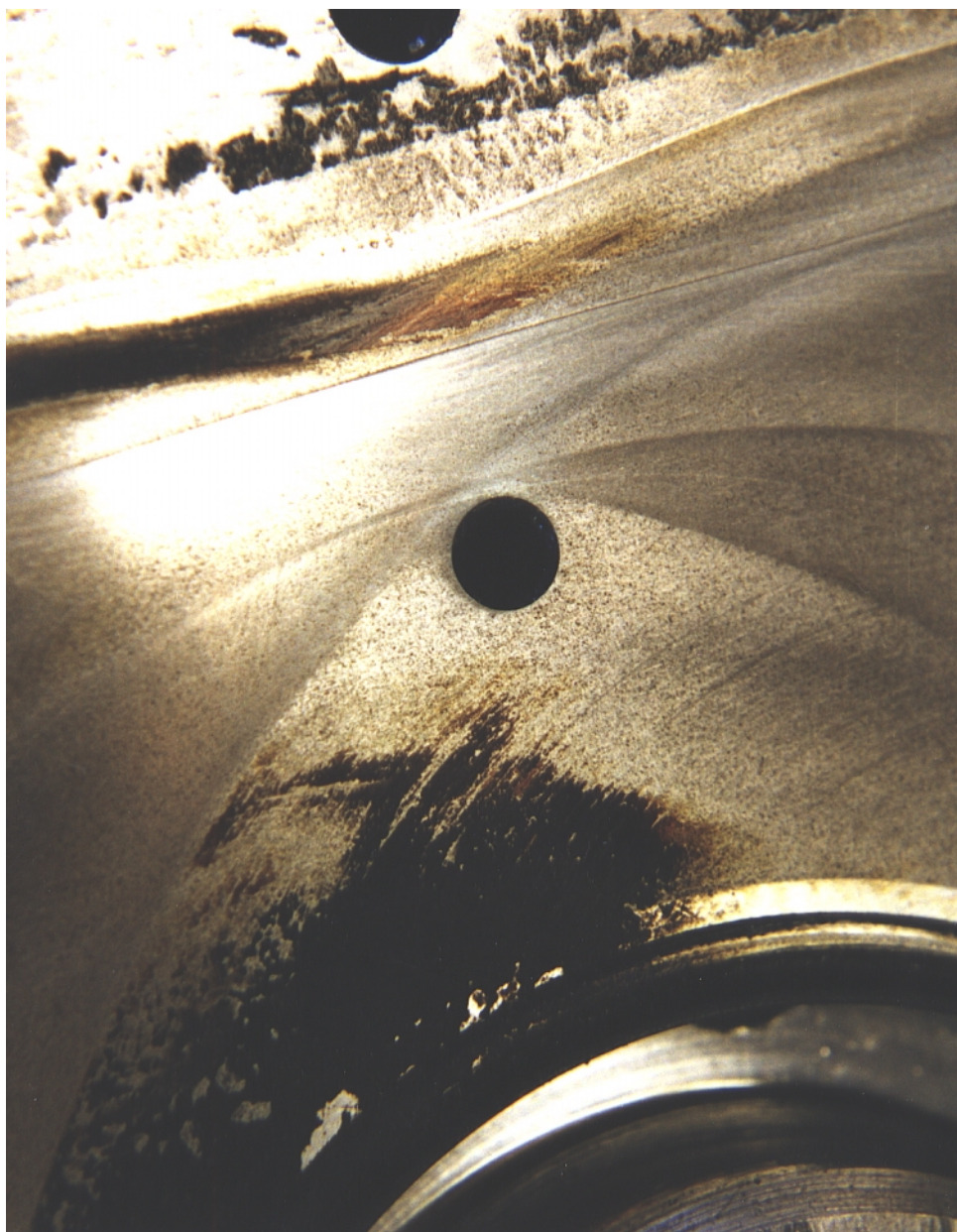


Bild 6.6.5: kritischer Verschleißbereich der Seitenscheibe

6.6.5 Öldichtsystem des Läufers

Die Problematik in der vorliegenden Konstruktion hinsichtlich des Öldichtsystems liegt in dem zur Verfügung stehenden Bauraum. Im wesentlichen sind zwei verschiedene Konfiguration üblich: eine axiale Abdichtung mit Kratzring(en) oder eine radiale mit Wellendichtringen.

Der vorhandene Bauraum der im Kolbenläufer der LOCR-Geometrie reicht nicht aus, um auf jeder Seite zwei Kratzringe unterzubringen, was sich in der Vergangenheit als günstig erwiesen hat, um ein überdurchschnittlich gutes Verschleißverhalten zu erzielen. Der Kratzring besteht aus einem Gußmaterial als Grundkörper mit einer aufgetragenen Chromschicht im Bereich der schräg ausgebildeten Abstreifkante gegen Verschleiß.

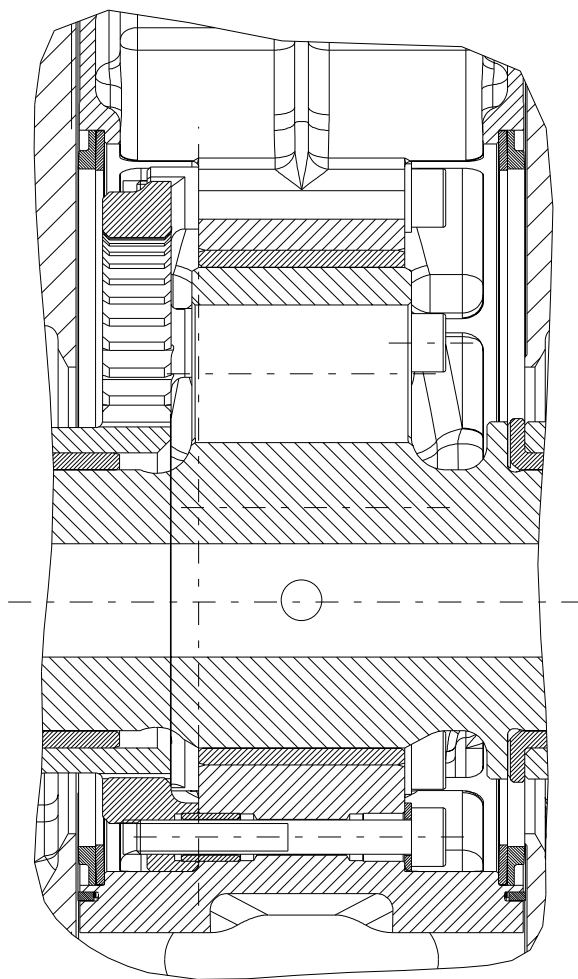


Bild 6.6.6: Kratzring-Abdichtung

Die bisher eingesetzte Molybdänschicht auf der Seitenscheibe, welche durch Flamspritzen aufgebracht wird, ist sehr widerstandsfähig, besitzt aber eine für den Laufpartner ungünstigere Oberflächenstruktur als eine im Jet-Spray-Verfahren applizierte Beschichtung, welche über ein höheres Ölhaltevermögen verfügt.

Da dieses alternative Beschichtungsverfahren auch von der ökonomischen Seite interessant ist, wurde in einem Versuch die Tauglichkeit dieser Lösung ermittelt. Unter Belastung im Zyklusbetrieb zeigte sich folgendes Bild: Verschleißverhalten gegenüber der Gasdichtung (Seitendichtleisten) wie gewohnt. Eine einmalig gegenüber den Kratzringen aufgetretene, bisher nicht beobachtete Setzerscheinung konnte auf einen Fehler bei der Einhaltung des Beschichtungsprozesses zurückgeführt werden.

Radiale Ölabdichtungen wurden schon in früheren Konstruktionen (z.B. NSU) verwendet, bestanden dort aus Kolbenringen. Mittlerweile hat sich die Dichtungstechnik weiterentwickelt und bietet fortschrittlichere Lösungen. Hierzu zählen insbesondere Materialien mit sehr gutem Eigenschmierverhalten bei gleichzeitig hoher Temperaturfestigkeit, wie z.B. der Kunststoff PTFE.

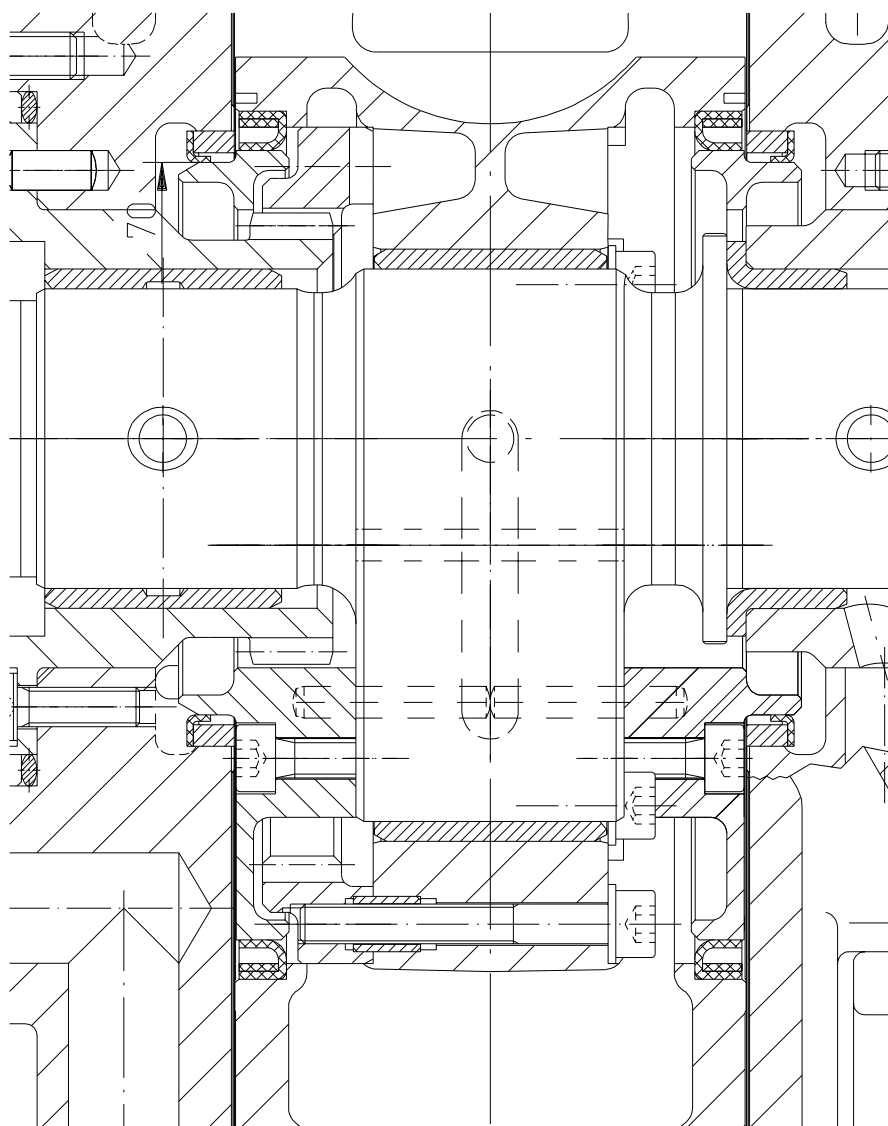


Bild 6.6.7: radiale PTFE-Öldichtung mit Schleuderscheiben

Es wurde eine Modifikation an einem vorhandenen 1-Läufer-Versuchsmotor vorgenommen, und entsprechende Dichtringe in Sonderbauform nach Maßgabe beschafft. Es zeigt sich, daß diese Lösung bei dieser Vorgehensweise konstruktiv aufwendiger ist, da spezielle Zwischenteile mit kleiner Toleranz gefertigt werden müssen.

Die benutzten Dichtkomponenten aus PTFE besitzen aufgrund ihrer Baugröße keine zusätzlichen Federelemente, ihre Funktion setzt einen positiven Differenzdruck zwischen den getrennten Räumen voraus. Da im Betrieb Blow-by-Gas auftritt, wird dieser in der untersuchten Konstruktion hierzu herangezogen. Um zu hohe Werte zu vermeiden, welche in Form von Schleppleistung den

Wirkungsgrad verschlechtern, ist es erforderlich, den Druck über geeignete Maßnahmen, z.B. ein zusätzliches Ventil, zu regeln. Dies wird noch dadurch erschwert, daß im aufgeladenen Betrieb mit Abgasturbolader (und später geringerem Außendruck im Höhenbetrieb) ein wesentlich weiterer Bereich gefahren werden muß.

Im Zusammenspiel mit dem ersten Dauerlauf zur Untersuchung der Radialdichtleisten wurde diese Version mitgetestet. Es zeigte sich dabei folgendes:

Bei Einhaltung aller Randbedingungen wird eine ausgezeichnete Wirkung erzielt. Im Rahmen des Versuchsbetriebes traten aber verschiedene Faktoren auf, die zu einer Überschreitung von zulässigen Grenzen führten. Z.B. zeigte sich die Druckregelung anfällig gegenüber Verschmutzungen, was zu einem kurzzeitig hohen Druckanstieg an den Dichtungen führte und diese mechanisch zerstörte, da keine ausreichende Überlastfähigkeit vorhanden war. Weiterhin verhielt sich das System auch empfindlich gegenüber kleinen Abweichungen in der Montage.



Bild 6.6.8: eingerissener PTFE-Radialwellendichtring

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde dieser Weg für die Erstellung der Mustermotoren nicht weiterverfolgt, da auch ein Risiko in der Umsetzung von angedachten Modifikationen der Dichtung selbst besteht (in das Dichtelement integrierte Feder, um auf die Druckregelung verzichten zu können).

6.6.6 Hochdruckeinspritzung

Die Hochdruckkraftstoffeinspritzung durch die Radialkolben-Verteilereinspritzpumpe läuft im Prinzip nach dem selben Muster ab wie in einem Hubkolben-Dieselmotor. Dennoch sind signifikante Unterschiede vorhanden, die eine Adaption von bestimmten Bauteilen an den Vielstoff-Wankelmotor erfordern.

Zunächst ist die Einspritzfrequenz gegenüber einem konventionellen Viertakt-Hubkolben-Dieselmotor verdoppelt (eine Einspritzung pro 360° Exzenterwellenwinkel und Läufer im Gegensatz zu einer Einspritzung pro 720° Kurbelwinkel und Zylinder). Dazu kommt ein im Vergleich zu konventionellen Dieselmotoren großes Drehzahlband (Leerlauf bis 6000 1/min). Das erforderliche Einspritzzeitfenster liegt gegenüber einem 4-Takt-HKM aber um ein Drittel niedriger, da der 4-Takt-Prozess beim KKM über drei volle Wellenumdrehungen geht.

Eine Anpassung an die besonderen Erfordernisse konnte durch folgende Maßnahmen erreicht werden:

- der Antrieb der Verteilereinspritzpumpe ist wie bei konventionellen Viertakt-Dieselmotoren im Verhältnis 2:1 untersetzt,
- die wirksame Kolbenfläche wurde durch die Verwendung von mehreren, gleichzeitig arbeitenden Pumpenelementen vergrößert,
- die Masse der einzelnen Elemente wurde gleichzeitig verkleinert (Massenträgheit),
- der Hubweg der Elemente wurde verkleinert,
- das Totvolumen des Einspritzsystems und der innere Querschnitt des Einspritzrohrs wurden konsequent minimiert (Kompressibilität bzw. Dämpfungsverhalten des Fluids Kraftstoff).

Das durch die Maßnahmen erreichte Einspritzbild wurde auf einem Einspritzpumpenprüfstand überprüft und entspricht den Erwartungen für einen Wankel-Vielstoffmotor. Beim Betrieb mit Dieselmotorkraftstoff ergab sich trotz der höheren Einspritzzahl ein mit konventionellen Dieselmotoren vergleichbares Verschleißbild.

Bei Kerosinbetrieb führen die schlechten Schmiereigenschaften jedoch zu einem schnellen Fressen der bewegten Teile und so zu einem Ausfall der Hochdruckpumpe. Prinzipbedingt gibt es bei handelsüblichen Verteiler-Einspritzpumpen, z.B. aus dem Automobilbereich, keine technische Möglichkeit, die Schmierung der kritischen Stellen z.B. durch eine Versorgung aus dem Motorölkreislauf sicherzustellen. Eine Möglichkeit der Problemlösung könnte in der Verwendung von Keramikteilen oder keramischen Beschichtungen an den tribologisch kritischen Stellen liegen. Von einem Hersteller wurde die Verfügbarkeit einer solchen Pumpe avisiert, allerdings nicht mehr im Vorhabenszeitraum realisiert.

Bis auf weiteres kann bei Einsatz von handelsüblichen Verteilereinspritzpumpen ein Kerosinbetrieb mit einer Gemischschmierung erfolgen. Wie in Abschnitt 6.6.4 erläutert, ist der geringe Öleintrag bei der Verbrennung im Wankelmotor als in jeder Hinsicht unkritisch anzusehen.

6.6.7 Zündsystem

Die Fremdzündung von der mit der Hochdruckdirekteinspritzung erzeugten Schichtladung über eine Zündkerze stellt eine Sonderform dar. Zwei Besonderheiten treten dabei auf:

- erhöhter Zündspannungsbedarf bei Betrieb mit Kerosin oder Diesel gegenüber dem ottomotorischen Benzinbetrieb,
- erhöhte thermische Belastung bei der Entflammung der Schichtladewolke.

Im ersten Punkt hat sich empirisch gezeigt, daß auf dem Markt verfügbare Komponenten ausreichen und insbesondere die im Automobilbereich übliche Spulenzündung ausreichende Zündenergie zur Verfügung stellt.

Im zweiten Punkt war geplant, eine Zusammenarbeit mit einem Zündkerzenhersteller einzugehen. Trotz intensiver Bemühungen konnte dies nicht erreicht werden. Leider besitzen die

entsprechenden Firmen nicht genügend Kapazität, um sich mit Sonderanwendungen (Aussicht nur kleiner Stückzahlen) zu befassen; auf der anderen Seite wird zur Zeit intensiv an der Entwicklung von Zündkerzen für direkteingespritzte Benzinmotoren (GDI) gearbeitet, die ähnlichen Belastungen wie im vorliegenden Anwendungsfall unterworfen sind. In dieser Phase der Entwicklung ist es auch schwierig schon Muster aus dieser Entwicklung zu bekommen, aus verständlichen Gründen. (Schutz des eigenen Know-hows, solange noch keine Ausschöpfung des Marktes erfolgt ist, bzw. nicht zugängliche Entwicklung im Kundenauftrag.)

Aus Voruntersuchungen bei WANKEL ist bekannt, daß ein ganz wesentlicher Punkt für den Elektrodenverschleiß von der Ausbildung der Schichtladungswolke um die Elektroden ist. Durch Variation des Abstandes der Funkenstrecke der Zündkerze zur Trochoide kann hierauf Einfluß genommen werden. Dies ist aber nicht beliebig einstellbar, da auch die Zündwilligkeit unter allen Betriebsbedingungen (Last, Drehzahl, ...) gewährleistet sein muß. Da die ursprünglich angestrebte Verwendung eines auch von der Einspritzstrategie variablen Systems (Common-Rail) nicht zur Verfügung stand, konnte von dieser Seite keine Optimierung erfolgen.

Als Kerze mit der höchsten Standzeit im Teillastbereich unter den auf dem Markt verfügbaren hat sich in den durchgeführten Untersuchungen eine Kerze mit Einfach-Elektrode aus dem Sonderwerkstoff Platin (Beru 14-4 DPO) bewährt. Der Elektrodenabbrand stieg dabei innerhalb von 150 h von anfänglich 0.8 mm auf 1.2 mm und gewährleistete dort noch einwandfreies Start- und Leerlaufverhalten.

In weiteren Vorversuchen konnten mit einer Zweifach-Elektroden-Kerze (NGK CR-8EK bzw. Ersatztyp von DENSO U24ETR) ähnlich gute Ergebnisse erzielt werden. Da diese Kerzen einen kleineren Gewindedurchmesser besitzen, haben sie Vorteile bezüglich des thermischen und mechanischen Verhaltens auch der Gehäuseteile und Radialdichtleisten.



Bild 6.6.9: Zündkerze eines Wankel-Vielstoffmotors

Für eine Serienentwicklung können später sicher handelsübliche Zündkerzen für GDI-Motoren in passender Ausführung, sofern sie dann verfügbar sind, einbezogen werden.

7. Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Im Rahmen des Vorhabens konnte nachgewiesen werden, daß die WANKEL-Kreiskolbentechnologie grundsätzlich als Kerosin-Flugantrieb geeignet ist.

Neben den prinzipbedingten Vorteilen des Wankel-KKM - kompakt, leicht, vibrationsarm, einfacher modularer Aufbau, kostengünstig bezogen auf die gesamte Lebensdauer - kommen damit die zusätzlichen Vorteile wie Kerosinfähigkeit, geringer Verbrauch und Schadstoffemission sowie ausgezeichnete Höhenleistung gegenüber den bisher eingesetzten Antriebslösungen: Benzin-HKM (verbleites AVGAS !), Turbotriebwerk (Verbrauch, Kosten !), Selbstzünder-HKM (Gewicht, Zuverlässigkeit !) o.a.

Während fast alle Versuche, mit Hubkolbenmotoren vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, sei es durch Adaption vorhandener Triebwerke (z.B. Automobilmotoren) oder durch Neuentwicklung (2-Takt-Diesel-Flugmotor), bisher keine greifbaren Resultate lieferten, ist der hier eingeschlagene Weg ein vernünftiger Mittelweg bezüglich Kosten, Leistung, Verbrauch, Gewicht und Haltbarkeit. Bemerkenswert ist, daß dies mit einer Adaption und nicht mit einer Neuentwicklung erzielt wurde, was auf weiteres Potential hindeutet.

Nach diesem ersten Schritt wäre es folgerichtig, in die Anwendung zu gehen. Dies erfordert dann entsprechende Integrationsarbeiten mit Erstellung eines Propellergetriebes (vorgesehen für eine Doppelmotor-Konfiguration), anwendungsspezifische Komponentenanordnung, etc., um in ein Flugversuchsprogramm einzusteigen.

Alternativ - oder parallel - ist es auch möglich, eine komplette Neuentwicklung für einen Flugmotor zu starten, um das vorhandene Potential voll auszuschöpfen. Voraussetzung hierfür ist allerdings, daß entsprechende finanzielle Mittel vorhanden sind, die solch eine Entwicklung erfordert.

Für einen modernen Flugmotor mit den aufgezeigten Eigenschaften ist ein großer Markt vorhanden. Schätzungsweise existieren in dem in Frage kommenden Marktsegment weltweit knapp 350.000

Flugzeuge, von denen etwa ein Viertel zwischen 20 und 30 Jahre alt und fast ein weiteres Viertel noch älter ist.

Daraus ist ersichtlich, welcher großer Erneuerungsbedarf an kompletten Flugzeugen besteht, die mit einem neuen und modernen Antrieb ausgerüstet sein könnten. Für die Flugzeuge mit einem Alter von über 40 Jahren entspricht dies für die nächsten Jahre einer Stückzahl von ca. 20.000 bis 30.000. Hinzu kommt der Retrofit-Markt, d.h. der Ersatz eines alten Triebwerks in einem Flugzeug durch ein neues, modernes Triebwerk, der aber ungleich schwieriger einzuschätzen ist, da hier die Wirtschaftlichkeit im Einzelfall nachzuprüfen ist. (Anpassung der gesamten Peripherie; Zulassungsproblematik)

Mit einem neuen modernen Kolbentriebwerk lassen sich aber auch völlig neue Marktsegmente erschließen. Im Bereich der Hubschrauber z.B. klafft auf Grund des Fehlens eines geeigneten Triebwerks eine Lücke zwischen den Kleinsthubschraubern mit Hubkolbenmotoren und den kommerziellen Geräten, welche mit Turbo-Triebwerken ausgerüstet sind und deshalb sowohl in der Anschaffung als auch im Unterhalt mindestens eine Größenordnung in den Kosten höher liegen als erforderlich bzw. mit Kreiskolbenantrieb möglich.

Das durchgeführte Vorhaben ist sicherlich nur ein bescheidener Schritt auf dem gesamten Weg; wie sich gezeigt hat, darf der Aufwand für eine weiterführende Entwicklungsaufgabe nicht unterschätzt werden ! - Der mögliche Nutzen (Weltmarkt) ist aber andererseits ebenso vielversprechend und wirtschaftlich lukrativ.

8. Fortschritt bei anderen Stellen

Wesentliche neuere Erkenntnisse, die direkt anwendbar sein könnten, als zu Beginn des Vorhabens sind WANKEL ROTARY nicht bekannt geworden.

Zwar schreitet die Entwicklung im Bereich der Hubkolbenmotoren aufgrund der aufgewendeten hohen Mittel im Automobilsektor weiter fort, zum einen handelt es sich dort aber um Detailoptimierungen oder aber die angewendeten Verfahren bzw. die dort erzielten Ergebnisse können prinzipbedingt nicht übertragen werden.

Im Hinblick auf eine spätere Verwertbarkeit ist außerdem zu bedenken, daß im Rahmen des Vorhabens nur Technologien in Form von verfügbaren Lösungen (Werkstoffe, Komponenten, etc.) einbezogen werden konnten. Als Beispiel kann hier die Common-Rail-Einspritztechnik genannt werden, die innerhalb des Vorhabenszeitraumes zu vertretbaren Kosten und mit entsprechender Entwicklungsunterstützung nicht dargestellt werden konnte.

9. Veröffentlichungen

Eine Veröffentlichung in Form eines Zeitschriftenbeitrages oder einer eigenständigen Publikation ist derzeit noch nicht eingeleitet.

Eine erste Präsentation der Ergebnisse in öffentlichem Rahmen wird am 13. März 2000 innerhalb einer DGLR-Vortragsreihe (Bezirksgruppe Braunschweig) erfolgen.

Weitere Präsentationen sind zwar vorgesehen, fallen aber nicht mehr in den neunmonatigen Veröffentlichungszeitraum.

Aus diesen Gründen wird der vorliegende Abschlußbericht an die TIB - Deutsche Forschungsberichte weitergegeben.