

BMWi Vertrag

WiT 9501 G

Verbundfördervorhaben Total Engine Control (TEC)
Studie

Untersuchung der Materialeignung für den Einsatz von
faserverstärkter Keramik (CMC) zur Kraftstoffdosierung

Schlußbericht MT 99 TEC 01

Berichtszeitraum
17.07.1995 bis 30.11.1998

Verfasser: Dr. Horst Wurtinger _____

Projektleiter: Dr. Thomas Petzold _____

März 1999

MAN Technologie AG
Leichtbausysteme

Liebigstr. 5a
D - 85757 Karlsfeld

 +49/8131/89-1840
Fax +49/8131/89-1914

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report Final Report	
3a. Report Title Investigation of the Suitability of Ceramic Matrix Composite (CMC) for a Fuel Main Metering Valve		
3b. Title of Publication		
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Dr. Horst Wurtinger		5. End of Project 30.11.1998
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))		6. Publication Date
8. Performing Organization(s) (Name, Address) MAN Technologie AG Lightweight Systems Liebigstraße 5a D-85757 Karlsfeld		7. Form of Publication
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi) 53107 Bonn		9. Originator's Report No. MT 99 TEC 01
		10. Reference No. WiT 9501 G
		11a. No. of Pages Report 32 + 40
		11b. No. of Pages Publication
		12. No. of References
		14. No. of Tables 2
		15. No. of Figures 17
16. Supplementary Notes		
17. Presented at (Title, Place, Date)		
18. Abstract In direct cooperation with PLU a fuel main metering valve (MMV) made of ceramic matrix composite (CMC) was designed according to an existing metal version and produced as a prototype. At PLU a functional test was performed in an existing simulation test rig. The principle technical suitability of CMC for the mentioned application could be shown. For the final proof of suitability further qualification tests under special operating conditions are necessary. An economical use of CMC for this purpose cannot be seen for the moment		
19. Keywords Ceramic Matrix Composite (CMC); Main Metering Valve (MMV); Jet Engine		
20. Publisher		21. Price

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Schlußbericht
3a. Titel des Berichts Untersuchung der Materialeignung für den Einsatz von faserverstärkter Keramik (CMC) zur Kraftstoffdosierung.	
3b. Titel der Publikation	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Dr. Horst Wurtinger	5. Abschlußdatum des Vorhabens 30.11.1998
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) MAN Technologie AG Leichtbau und Apparate Liebigstraße 5a D-85757 Karlsfeld	9. Ber.Nr. Durchführende Institution MT 99 TEC 01
	10. Förderkennzeichen *) WiT 9501 G
	11a. Seitenzahl Bericht 32 + 40
	11b. Seitenzahl Publikation
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi) 53107 Bonn	12. Literaturangaben
	14. Tabellen 2
	15. Abbildungen 17
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung In direkter Zusammenarbeit mit PLU wurde ein Kraftstoff-Zumeßventil (Main Metering Valve, MMV) aus faserverstärkter Keramik (CMC), entsprechend einer Serien-Metallversion ausgelegt und als Prototyp hergestellt. Bei PLU wurden in einem vorhandenen Simulations-Prüfstand Funktionstests durchgeführt. Die grundsätzliche technische Eignung von CMC für diesen Anwendungsfall konnte nachgewiesen werden. Für den endgültigen Nachweis sind weitere Qualifikationstests unter extremen Betriebsbedingungen notwendig. Der wirtschaftliche Einsatz von CMC wird für diesen Anwendungsfall zur Zeit noch nicht gesehen.	
19. Schlagwörter Faserverstärkte Keramik (CMC); Kraftstoff-Zumeßventil; Flugtriebwerk	
20. Verlag	21. Preis

*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

Inhalt

Berichtsblatt mit Kurzfassung	2
Document Control Sheet	3
Inhalt	4
1 Einleitung	5
2 Aufgabenstellung	6
3 Planung	8
4 Dokumentation	9
5 Erfindungen	9
6 Durchgeführte Arbeiten	10
6.1 Auslegung	10
6.2 Fertigungsvorversuche	13
6.3 Herstellung von Testkomponenten (Prototypen)	14
6.4 Durchflußtests	15
7 Zusammenfassung und Ausblick	17
8 Anhang 1 (Bilder 1 - 17)	18
9 Anhang 2 (PLU - Berichte)	32

1 Einleitung

Das vorliegende Projekt ist ein Teilvorhaben im Rahmen der Technologie-Entwicklung „Total Engine Control“ (TEC).

Das Gesamtvorhaben hat die Konzeption, Entwicklung und Validierung eines innovativen Kernsystems einer umfassenden Regelung (Total Engine Control, TEC) zukünftiger schadstoffarmer Triebwerke zum Gegenstand. Es ist als Verbund-Fördervorhaben konzipiert. Die Partnerfirmen sind:

BMW Rolls-Royce (BMW RR),
Bodenseewerk Gerätetechnik (BGT),
Pierburg Luftfahrt Geräte Union (PLU),
MAN Technologie (MT),
Nordmicro (NM),
Technische Universität Berlin (TUB)

Die Arbeitsschwerpunkte der beteiligten Firmen sind:

BMW RR: Systemdefinition und Erprobung
BGT: Digitalelektronisches Regelungs- und Überwachungssystem
PLU: Kraftstoffzumessung
MT: Werkstofftechnologie
NM: Drucksensor-Modul
TUB: Forschung zur Zustandsüberwachung an Triebwerken

2 Aufgabenstellung

Das Ziel des vorliegenden Teilvorhabens ist die Anwendung von faserverstärkter Keramik (CMC) für Komponenten der Kraftstoffzumessung im Triebwerk. Die Vorteile von CMC gegenüber herkömmlicher Metallbauweise liegen vor allem in der Massenreduktion infolge niedriger Dichte (Stahl 7,8 g/cm³; CMC 2,1 g/cm³), was zur Effizienzsteigerung des Gesamtsystems beiträgt und geringem Verschleiß, was zur Erhöhung der Dosiergenauigkeit und längerer Standzeit führt. Hinzu kommt die geringe Stoßempfindlichkeit und relativ hohe dynamische Belastbarkeit des Materials, was vor allem CMC gegenüber monolytischer Keramik hervorhebt. Als Untersuchungskomponente wurde das Haupt-Kraftstoff-Zumeßventil (Main Metering Valve, MMV) ausgewählt, da hierbei alle wesentlichen Anforderung an solche Bauteile untersucht werden können.

Die wichtigsten Entwicklungsschritte waren:

- Anpassung der konstruktiven Gestaltung an die Erfordernisse von faserverstärkter Keramik.
- Mechanische Bearbeitung der Oberflächen unter Einhaltung vorgegebener enger Fertigungstoleranzen.
- Herstellung von testfähigen Prototypen aus SiC/SiC nach dem Gradienten-Gasfiltrationsverfahren.
- Funktionstests im System.

Die Arbeiten wurden in enger Zusammenarbeit mit PLU durchgeführt.

Aufgabenteilung:

Konstruktive Gestaltung:	PLU / MT
Auslegung und Herstellung der Test-Bauteile:	MT
Funktionstests im Simulations-Prüfstand:	PLU

Die Aufgabenlösung wurde nach folgendem Entwicklungsplan durchgeführt:

- CMC-gerechte Auslegung und Konstruktion von Hülse und Kolben
- Fertigungsversuche, insbesondere zur Definition der Fertigungsparameter für die mechanische Bearbeitung der Paß- und Laufflächen, sowie der Bohrungen und Durchbrüche
- Herstellung von Labormustern für erste Funktionstests bei PLU
- Durchführung von Funktionstests bei PLU in einem vorhandenen Simulations-Prüfstand zum prinzipiellen Nachweis der Funktionstüchtigkeit des CMC-Ventils
- Auslegung und Herstellung eines Prototypen auf Basis der beim Labormuster gewonnenen Erkenntnisse für weiterführende Funktionstests bei PLU (Konstruktive Version wie Labormuster)
- Funktionstests bei PLU wiederum im vorhandenen Simulations-Prüfstand

3 Planung

Die ursprüngliche Planung hat sich nur innerhalb der Laufzeit des Gesamtprogrammes nach hinten verschoben (siehe Meilensteinpläne vom 21.02.1995 und 08.04.1997 auf den Bildern 1 und 2), wobei jedoch auf die Erprobung bei BRR verzichtet wurde.

Um relativ frühzeitig Testergebnisse zu erhalten, war vorgesehen, zunächst eine einfache, existierende Version des Zumeßventils in Keramik (genannt Labormuster) umzusetzen, da für dieses Ventil bereits ein Simulations-Prüfstand bei PLU im Einsatz war, auf der entsprechende Funktionstests im Vergleich zur Metallausführung durchgeführt werden konnten.

Auf Basis dieser Vorversuche sollte ein Prototyp in der TEC Version ausgelegt und hergestellt werden. Dieser Prototyp sollte bei PLU im TEC-Meßstand überprüft und bei BRR im zugehörigen Testtriebwerk erprobt werden.

Im Laufe der Entwicklung zeigte sich jedoch, daß es nicht sinnvoll ist, die sehr komplexe TEC Version im Rahmen des laufenden Programmes in Keramik umzusetzen.

Auf die Erprobung im Triebwerk bei BRR mußte deshalb in Abstimmung mit PLU und dem Projektträger verzichtet werden. Statt dessen wurde eine weitere Iterationsschleife zur Beseitigung der am CMC-MMV aufgedeckten Mängel mit nochmaligen Tests im Simulations-Prüfstand durchgeführt.

4 Dokumentation

Im Laufe dieses Projektes sind folgende Dokumente erstellt worden:

- | | | | |
|-------|---------------------------------------|--------------|----------------------------------|
| [1] | Zwischenbericht | MT 95 TEC 01 | (Dez. '95) |
| [2] | Zwischenbericht | MT 96 TEC 01 | (Juli '96) |
| [3] | Zwischenbericht | MT 96 TEC 02 | (Dez. '96) |
| [4] | Präsentation beim EC Workshop | | 15. - 16. April 1997, Überlingen |
| [5] | Zwischenbericht | MT 97 TEC 01 | (Juli '97) |
| [6] | Zwischenbericht | MT 97 TEC 02 | (Dez. '97) |
| [7] | Zwischenbericht | MT 98 TEC 01 | (Juli '98) |
| [8] | Präsentation bei der Abschlusssitzung | | 8. Dezember 1998, Oberursel |
| [9] | Schlußbericht | MT 99 TEC 01 | (März '99) |

5 Erfindungen

Von MAN Technologie AG sind im Rahmen dieses Vorhabens keine Schutzrechte angemeldet worden.

6 Durchgeführte Arbeiten

In Bild 3 ist die Funktionsübersicht der Dosiereinrichtung mit eingebauter CMC-Hülse und CMC-Kolben dargestellt. Der durch die Vierkantfenster eintretende Kraftstoff wird beim Austritt durch das Triangelfenster (Exponentialprofil) je nach Kolbenstellung in engen Toleranzen dosiert, wobei die Kraftstoffpumpe selbst unregelt ist. Über die Servoboehrungen wird mittels Kraftstoff mit Hilfe eines separaten Regelkreises (Druckdifferenzen) die Kolbenstellung und somit der Kraftstoffstrom gesteuert.

Der Max-Min-Anschlag begrenzt die Kolbenstellung nach beiden Seiten, das LVDT mißt über Induktivgeber die Kolbenstellung.

6.1 Auslegung

Als Basis für die Auslegung der CMC-Test-Dosierkolben wurde die bereits vorhandene Metallversion entsprechend PLU Vorgaben festgelegt, sowie die bei dieser Version auftretenden Temperaturen, Lasten und Medien. Dies hatte den Vorteil, daß relativ schnell die Funktionstüchtigkeit erprobt und Massenvergleiche durchgeführt werden konnten.

Bei der konstruktiven Ausführung mußten einerseits alle Funktions- und Einbaumaße, wie sie bei der Metallversion vorgegeben waren, eingehalten werden, andererseits mußten insbesondere bei den Kraftübertragungs- und -einleitungsbereichen die Erfordernisse eingearbeitet werden, die sich aus der Verwendung von faserverstärkter Keramik ergeben.

Da sich die Temperaturen in einem relativ niedrigen Bereich (-54°C bis + 170°C) bewegen, wurde als Basismaterial für die Hülse SiC/SiC ausgewählt, da sich dieser Werkstoff gegenüber C/SiC auch durch geringere Rißanfälligkeit und damit höhere Dichtigkeit auszeichnet. Um die Medienverträglichkeit des gewählten Materials zu prüfen, wurden SiC/SiC Probekörper in Kerosin ausgelagert. Bei einer Siedetemperatur von 170°C und 210 Stunden Lagerzeit lag die Gewichtsveränderung innerhalb der Meßgenauigkeit.

Für den Kolben wurde kurzfaserverstärktes C/SiC ausgewählt. Dieses Material hat den Vorteil, daß die komplizierte Kolbenkontur mit den scharfen Kanten in einem Zwischenstadium der Keramikherstellung nahezu auf Endmaß gedreht werden kann. Die Herstellung des Rohlings erfolgte bei der IABG, München im Unterauftrag. Auch die von der IABG angegebenen mechanischen Eigenschaften (E-Modul 240 N/mm²; Zugfestigkeit 140 N/mm²; Biegefestigkeit 180 - 200 N/mm²) erschienen ausreichend.

Die komplette Zusammenstellung des "CMC-Main-Metering Valve" ist auf der Zeichnung SK-A-0418-C (Bild 4) zu sehen.

Gestaltung der Hülse:

Für die Bohrungen, Laufflächen und Einbauf lächen des glatten Rohres wurden die Maße und Toleranzen der Metallversion direkt übernommen, da die ersten Funktionstests in einer bestehenden Kraftstoffzumeßeinrichtung im Prüfstand bei PLU durchgeführt werden sollten und für Vergleiche Testergebnisse der Metallversion vorlagen.

Bei der endgültigen Testplanung stellte sich heraus, daß die ursprünglich mit PLU abgestimmte Ventilkonstruktion (glattes Rohr ohne Flansch) zu Interfaceproblemen mit Komponenten dieser Kraftstoffzumeßeinrichtung führt. Dies machte die folgenden konstruktiven Anpassungen an CMC-Dosierkolben- und -hülse notwendig. Für eine Serienlösung wäre eine CMC-gerechte Konstruktion des Gesamtsystems notwendig.

1. Verwendung eines Metallflansches:

Ursprünglich sollte auf einen Flansch zum Fixieren der Hülse im Gehäuse verzichtet werden, da er sich aus CMC nur sehr aufwendig fertigen läßt. Dies hätte den Nachteil gehabt, daß die Fixierung in Längsrichtung jeweils an beiden Enden hätte erfolgen müssen. Wegen des unterschiedlichen Längenänderungsverhaltens von Metall und CMC unter Temperatur hätte dies möglicherweise zu hohen Eigenspannungen sowie einer Verschiebung der Kalibrierkurve in Abhängigkeit der Betriebstemperatur geführt, da sich die Basis für die induktive Wegmessung hätte verschieben können.

Aus diesem Grund wurde ein Metallflansch in Analogie zur Metallkonstruktion vorgesehen, der mit der CMC-Hülse verklebt wird. Dies wurde in dem Bewußtsein getan, daß diese Lösung aus Festigkeitsgründen nur für Erprobungen zum Nachweis der prinzipiellen Eignung von CMC für diesen Einsatz akzeptabel ist.

2. Verriegelung des Max-Min-Anschlages mit einem Bajonett:

Bei der Metallkonstruktion wird der Max-Min-Anschlag mit einem Bajonettverschluß verriegelt. Diese Lösung ist für CMC insofern ungeeignet, als dabei hohe Kräfte interlaminar übertragen werden müssen. Mit derselben Argumentation wie oben wurde sie jedoch für das CMC-Testmuster übernommen, so daß der Max-Min-Anschlag der Metallversion ungeändert übernommen werden konnte.

Die endgültige Testausführung der Hülse mit Flansch und Bajonettverschluß (Prototyp) ist in Zeichnung Nr. SK-A-0463-D (Bild 5) dargestellt.

Gestaltung des Kolbens:

Im ersten Entwurf war vorgesehen, den Schaft in einem Stück aus dem oben erwähnten kurzfaserverstärktem C/SiC herzustellen, da die rechnerische Zugbelastbarkeit mit ca. 11000 N oberhalb der von PLU angegebenen Zugbelastung von 5000 N mit ausreichender Sicherheit lag. Das gleiche galt auch für die Druckbelastung.

In einem Belastungsversuch brach das Schaftmittelteil auf Zug bereits bei 1600 N und auf Druck bei 5000 N. Daraufhin wurde die Konstruktion dahingehend geändert, daß nur noch der große und der kleine Teilkolben in CMC beibehalten wurden, während der Schaft aus Titan hergestellt wurde. Nach dem alten Konstruktionsstand sollten die Kolben auf dem Schaft mit Muttern befestigt werden. Um die Längen von Meßfühler (LVDT-Probe) und Max-Min-Kolben nicht ändern zu müssen, wurde auf die Muttern verzichtet und die genannten Teile zur Fixierung der Kolben auf dem Schaft verwendet. Zusätzlich wurden die Kolben mit dem verkürzten Schaft verklebt.

Die endgültige Testausführung des Kolbens (Prototyp) ist auf der Zeichnung SK-A-0417-D (Bild 6) wiedergegeben.

6.2 Fertigungsvorversuche

Zum Einbringen der Bohrungen und Durchbrüche, insbesondere der Triangel mit dem relativ engen Spalten an den Ecken, wurden verschiedene Methoden untersucht:

- Wasserstrahlschneiden
- Laserschneiden
- Draht-Funken-Erosion
- Ultraschall-Erosion

Wasserstrahlschneiden schied von vornherein aus, da die minimal mögliche Schnittbreite größer als der Spalt im Triangelausschnitt ist. Die thermischen Methoden Laserschneiden und Draht-Funken-Erosion führen zu ungleichmäßigen Verkohlungen an den Schnittkanten.

Mit der Ultraschall-Erosion konnten die genauesten Durchbrüche erzielt werden. Diese Methode wurde auch zur Herstellung der Labormuster und Prototypen angewendet.

Auf den Bildern 7 und 8 sind Schliffe der mit CVD-SiC beschichteten Triangeldurchbrüche zu sehen.

Es zeigt sich, daß der enge Spalt durch das Beschichten nicht geschlossen wird, d.h. daß auch dieser Bereich zur feinen Dosierung genutzt werden kann.

Zur Herstellung der Hülsen- und Kolbenrohlinge konnten die in anderen Programmen erarbeiteten Fertigungsparameter zu Grunde gelegt werden.

Zur Realisierung der engen Maßtoleranzen insbesondere bei den Durchbrüchen und Laufflächen mußten jedoch entsprechende Fertigungsvorversuche durchgeführt werden, die sich vor allem auf die mechanische Bearbeitung konzentrieren.

Bei der Herstellung der Hülse wird das CMC-Rohr auf Untermaß bearbeitet und danach im CVD-Verfahren mit SiC (Nennschichtdicke 200 µm) beschichtet. Während man bei den Bohrungen und Durchbrüchen ohne weitere Nachbearbeitung auskommt, müssen vor allem die Laufflächen auf der Innenseite des Rohres und die Paßflächen auf der Außenseite nachbearbeitet werden, da die Beschichtung nicht in den hier geforderten engen Toleranzen aufgebracht werden kann.

Dies bedeutet, daß bereits beim CMC-Rohrrohling Rundheit und Geradheit in engsten Toleranzen liegen müssen, damit bei der Endbearbeitung die 200 µm CVD-Schicht nicht durchgeschliffen wird.

Zur Bearbeitung der Innen- und Außenflächen des CMC-Rohlings, sowie der Außenflächen des beschichteten Rohres durch Naßschleifen waren die bei MT vorhandenen Schleifvorrichtungen gerade an der Grenze der Genauigkeit, wobei vor allem die Steifigkeit der Schleifspindel maßgebend ist.

Bei den ersten Labormustern stellte sich heraus, daß die konstruktiv geforderten Fertigungstoleranzen in Bezug auf Zylindrizität und Koaxialität der Hülsen-Laufflächen sowie das Paarungsspiel zwischen Hülse und Kolben mit den MT-Schleifvorrichtungen nicht erreicht werden konnten, was sich bei den Tests in teilweisen Fehlfunktionen äußerte.

Im Bild 9 sind Meßschriebe der Rohrrinnenfläche aufgezeichnet. Hier zeigen sich unzulässig hohe Maßabweichungen durch Einspannfehler bzw. Durchschliffe der Beschichtung.

Bei der Herstellung der Prototypen konnte zur Bearbeitung der Laufflächen, deren Rundheit und Geradheit maßgebend für die Leckraten sind, die bei PLU gewonnene Erfahrung bei der Bearbeitung der Metallhülsen und Kolben genutzt werden, wobei spezielle Werkzeuge und die exakte Einspannung der Bauteile maßgebend sind. Die entsprechenden Arbeiten wurden bei PLU im Unterauftrag durchgeführt, und zwar:

- Schleifen, Honen und Läppen der Hülse
- Schleifen des Kolbens (Paaren Kolben-Hülse)

Die im Bild 10 aufgetragenen Meßdaten zeigen, daß die bei Metallventilen entwickelten Bearbeitungsverfahren auch bei Keramik zur Erzielung der geforderten Fertigungstoleranzen angewendet werden können.

6.3 Herstellung von Testkomponenten (Prototypen)

Auf Basis der in den Fertigungsvorversuchen festgelegten Fertigungsparametern wurden die an PLU für Durchflußmessungen zu liefernden Prototypen hergestellt.

Auf den Bildern 12 bis 15 sind das Original-LVDT Meßsystem, der Deckel mit Bajonettverschluß sowie der Max-Min-Anschlag abgebildet. Bild 11 zeigt eine komplette Keramik-Hülse mit verklebtem Metallflansch und den Kolben in Hybridbau mit Anschlagzapfen.

Der komplette CMC-Satz (Hülse und Kolben) wiegt nur 40% der Metallausführung, wie aus folgender Tabelle hervorgeht:

	Metall	CMC
Kolben	90,5 g	34,8 g
Hülse	340,7 g	133,6 g
Σ	431,2 g	168,4 g

Beurteilung der Prototypen

Die Beschichtungen auf der Innenseite der Hülsen waren geschlossen und wiesen keine Schäden auf. Lediglich die Konturen der Zumeßfenster müssen als nicht optimal bezeichnet werden.

Die Fertigungstoleranzen der Prototypen konnten gegenüber denen des getesteten Labormusters erheblich verbessert werden und lagen im vorgegebenen Toleranzfeld. Die von den Original-Metallkomponenten übernommenen Toleranzen konnten somit auch bei den CMC-Komponenten erreicht werden.

6.4 Durchflußtests

Um möglichst schnell erste Erfahrungswerte über das Verhalten der CMC-Ventile im Funktionstest zu erhalten, wurden erste Durchflußmessungen an dem komplett bei MT gefertigten Labormuster durchgeführt.

Der Versuchsablauf und die Versuchsergebnisse sind im PLU Besprechungsbericht vom 16.10.1997 zusammengefaßt (s. Anhang 2).

Die Wertung dieser ersten Versuche gibt folgendes Bild:

- ◆ Die Maßhaltigkeit von Hülse / Kolben muß verbessert werden, um
 - Kalibrierabweichungen im unteren Durchflußbereich zu vermeiden (zu hohe Leckrate)
 - den gefährlichen Fall der Richtungsumkehr bei Fail Safe zu verhindern.
- ◆ Die Gleiteigenschaften der Keramik werden nach den ersten Versuchen als positiv bewertet.
- ◆ Die Kalibriergenauigkeit der Exponentialprofile entspricht den Erwartungen.
- ◆ Das Keramik MMV hat auch Festigkeitsmäßig nicht versagt. Es wurde ca. 10 Mal mit maximalem Druck (100 bar) auf den Max. Stop gefahren, d.h. ca. 5000 N Druckkraft auf Kolbenstange, Flanschverklebung und Bajonett.
- ◆ Eine endgültige Aussage über die Eignung des Keramik MMV kann erst nach den Contamination / Hot / Cold Tests getroffen werden.

Nachdem Prototypen mit den geforderten Maßtoleranzen gefertigt werden konnten, wurde einer der beiden Prototypen umfangreichen Funktionstests unterzogen. Der Versuchsplan ist dem PLU Bericht LE TEC-0004 "Testen des SiC-MMV" (s. Anhang 2) zu entnehmen.

Die Versuchsergebnisse sind in dem PLU Technical Report 98 MAN 002 (s. Anhang 2) zusammengefaßt und erlauben folgende Aussagen:

Ein Teil der für die Abnahme einer Kraftstoffzumeßeinrichtung vorgeschriebenen Tests wurde erfolgreich bestanden, d.h. die prinzipielle Eignung ist nachgewiesen. Um die Eignung abschließend beurteilen zu können, sind jedoch weitere Qualifikationstests unter extremen Betriebsbedingungen (Kälte und verschmutzter Kraftstoff) notwendig.

Die geplanten Untersuchungen hierzu konnten nicht mehr durchgeführt werden, da bei einem erneuten Funktionstest unter normalen Bedingungen der Kolben gebrochen war (siehe Bild 16).

Als Ursache für den vorzeitigen Bruch des CMC-Kolbens wird angenommen, daß bei dem relativ spröden kurzfaserverstärkten CMC-Material Spannungsspitzen und bereits im ungetesteten Einbauzustand vorhandene Risse (siehe Bild 17) die Dauerfestigkeit stark reduzieren und damit zum Versagen führen. Bei einer Weiterentwicklung müßte entsprechend nach einem anderen, besserer geeigneten Werkstoff für den Kolben gesucht werden.

Im Unterschied zu dem nur kurzfaserverstärkten Material des Kolbens ist das Material der Hülsen langfaserverstärkt. Des weiteren wird die Matrix bei den Hülsen im Unterschied zu den Kolben im Gradienten-CVI-Verfahren hergestellt. Es wird daher davon ausgegangen, daß bei der Hülse keine Dauerfestigkeitsprobleme auftreten werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen zur Eignung von faserverstärkter Keramik als Werkstoff für Kraftstoff-Zumeßventile zeigen folgendes Ergebnis:

- Bei der Herstellung können die für die Metallversion vorgegebenen Maßtoleranzen eingehalten werden.
- Die Massenreduktion gegenüber der Stahlversion beträgt 60%.
- Die prinzipielle Funktionstüchtigkeit wurde im Betriebstest nachgewiesen.
- Bei der Hülse konnten nicht alle Details keramikgerecht ausgeführt werden, da aus Kompatibilitätsgründen mit der vorhandenen Testeinrichtung teilweise Komponenten der Metallvariante verwendet werden mußten.
- Für den Kolben muß ein Material mit geringerer Rißanfälligkeit eingesetzt werden.
- Trotz erheblicher Gewichtseinsparung wird der wirtschaftliche Einsatz z.Zt. noch nicht gesehen.
- Bei Neuentwicklungen müssen bereits in der Konzeptphase eine keramikgerechte Gesamtkonstruktion und wirtschaftliche Serienfertigungskonzepte erarbeitet werden.

8 Anhang 1 (Bilder 1 - 17)

- Bild 1: Ursprünglicher Meilensteinplan
- Bild 2: Endgültiger Meilensteinplan
- Bild 3: Funktionsübersicht der Dosiereinrichtung
- Bild 4: Zusammenbau CMC- Main Metering Valve
- Bild 5: CMC-Hülse mit Flansch (Prototyp)
- Bild 6: CMC-Kolben (Prototyp)
- Bild 7: Triangeldurchbrüche - Schliff an Rohraußenoberfläche
- Bild 8: Triangeldurchbrüche - Schliff in 0,7 mm Tiefe
- Bild 9: Probleme der geforderten Fertigungsgenauigkeit
- Bild 10: Geforderte und gemessene Fertigungstoleranzen
- Bild 11: CMC-Hülse mit Flansch und Hybrid-CMC-Kolben
- Bild 12: Meßeinrichtung LVDT
- Bild 13: Meßfühler (auf Kolben montiert)
- Bild 14: Deckel mit Bajonettverschluß
- Bild 15: Max-Min-Anschlag
- Bild 16: Bruchbild CMC-Kolben
- Bild 17: Rißuntersuchung am Kolben

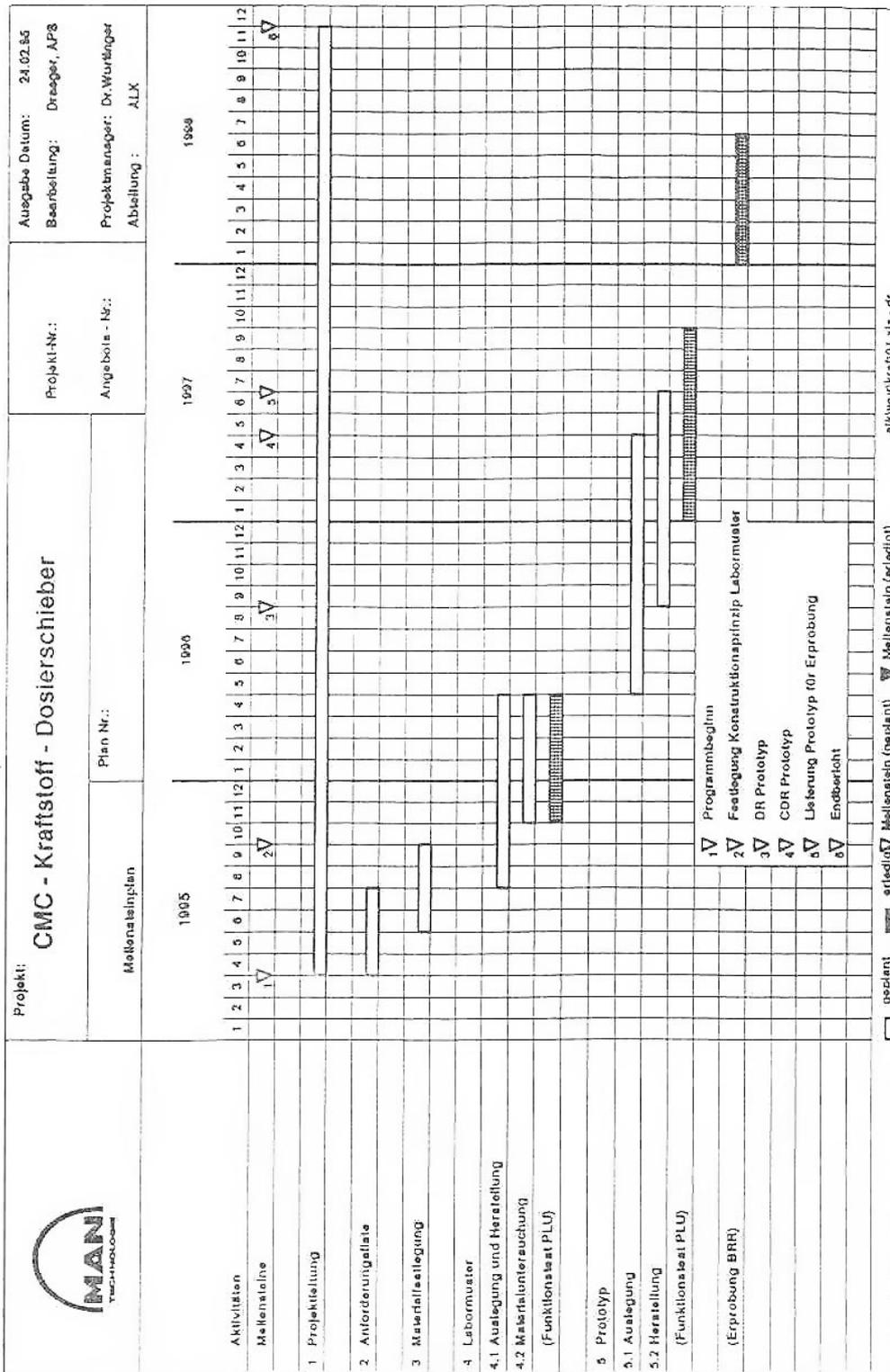


Bild 1: Ursprünglicher Meilensteinplan

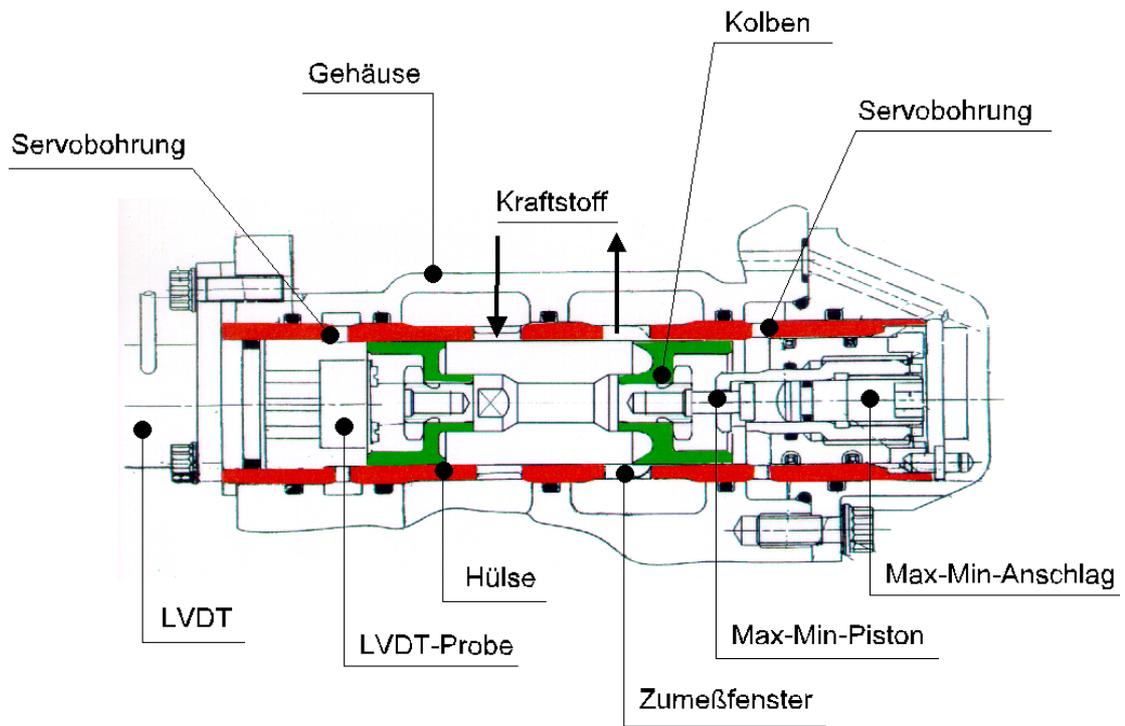
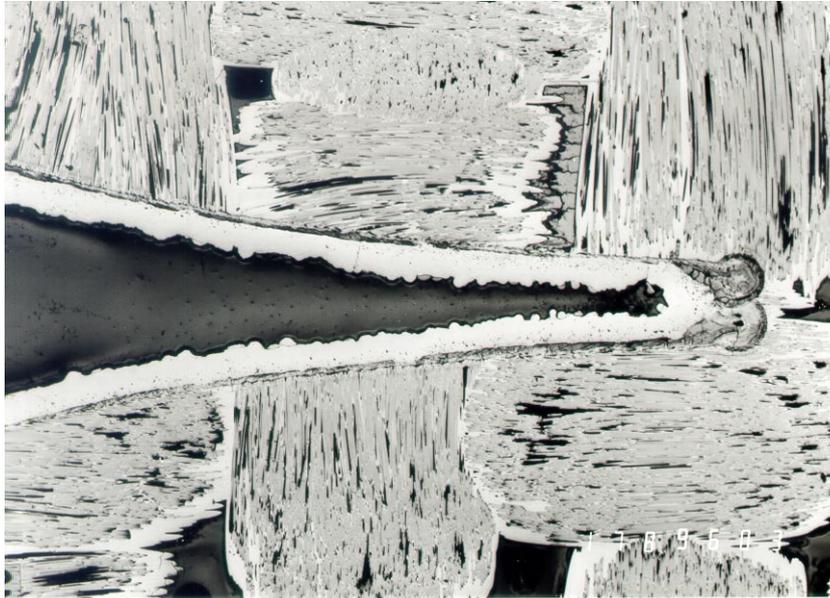
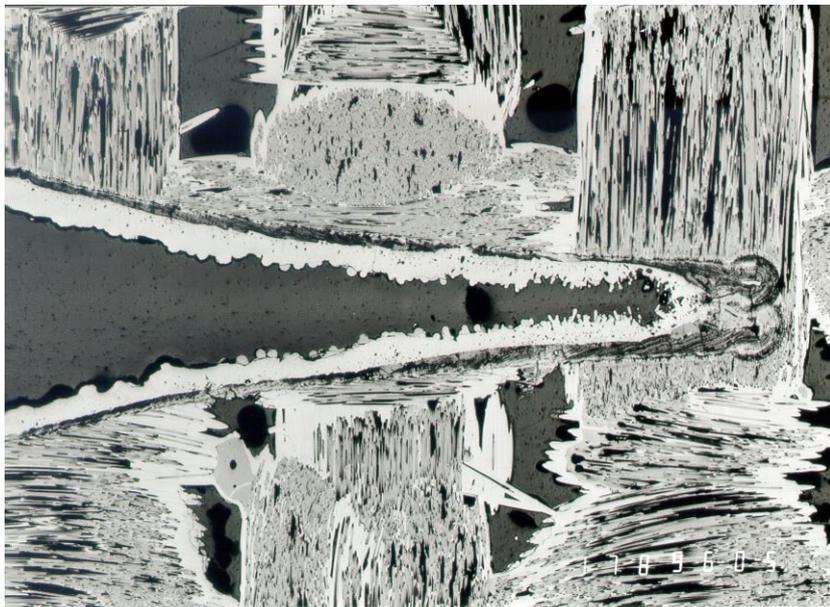


Bild 3: Funktionsübersicht der Dosiereinrichtung



(P24979)

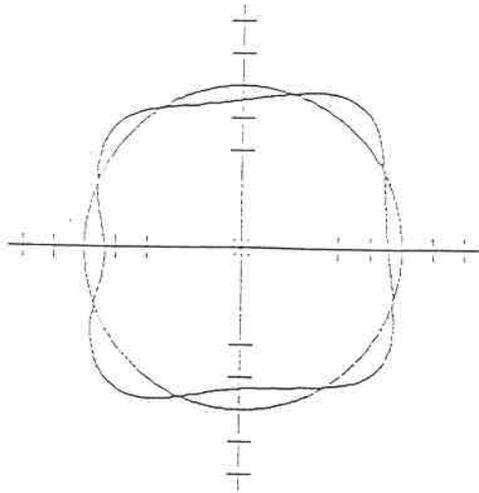
Bild 7: Triangeldurchbrüche - Schliff an Rohraußenoberfläche



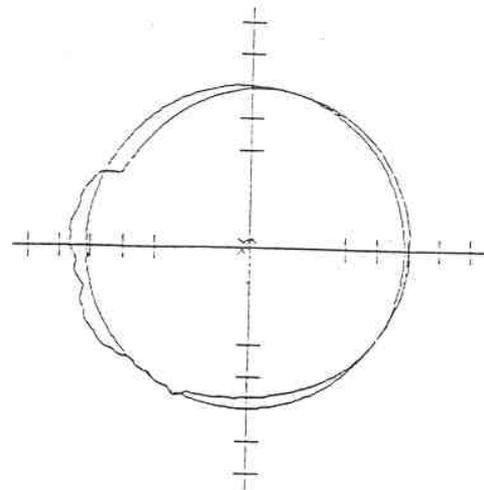
(P24981)

Bild 8: Triangeldurchbrüche - Schliff in 0,7 mm Tiefe

Gefordertes Spaltmaß 6 - 10 µm



Spannfehler
 10µm/SKT



Durchschliff der Beschichtung
 20µm/SKT

Bild 9: Probleme der geforderten Fertigungsgenauigkeit

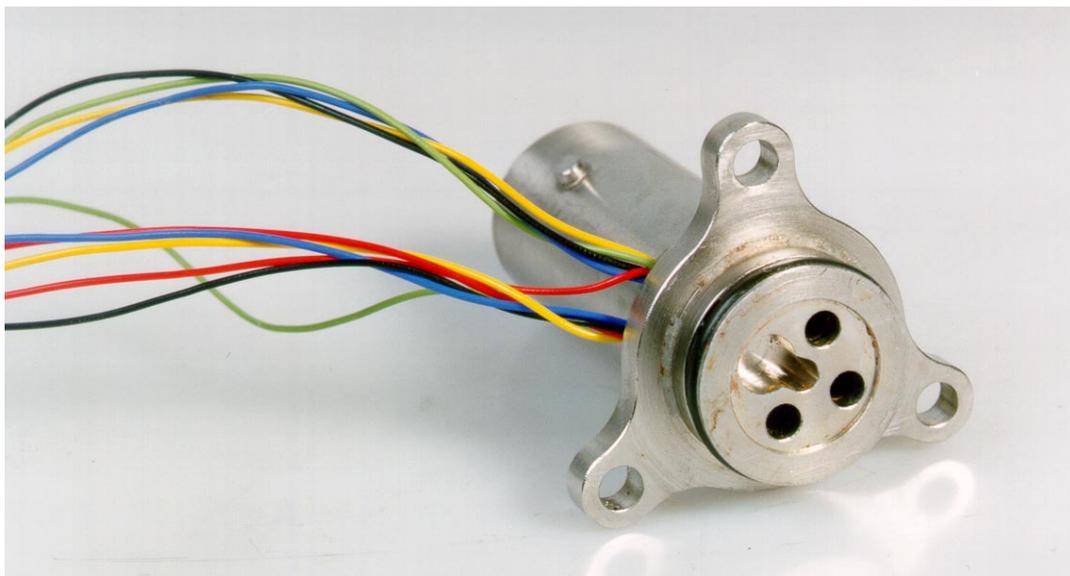
	Geforderte Toleranzen	Gemessene Toleranzen	
		I (Labormuster)	II (Prototyp)
Zylinderform	1,2, µm	34 µm	0,4 bzw. 1,3 µm
Konzentrität	25 µm	44 µm	0,7 bzw. 1,3 µm

Bild 10: Geforderte und gemessene Fertigungstoleranzen



(11887-92)

Bild 11: CMC-Hülse mit Flansch und Hybrid-CMC-Kolben



(11626-91)

Bild 12: Meßeinrichtung LVDT



(11626-111)

Bild 13: Meßfühler (auf Kolben montiert)



(11626-51)

Bild 14: Deckel mit Bajonettverschluß



(11626-71)

Bild 15: Max-Min-Anschlag



(11887-13)

Bild 16: Bruchbild CMC-Kolben

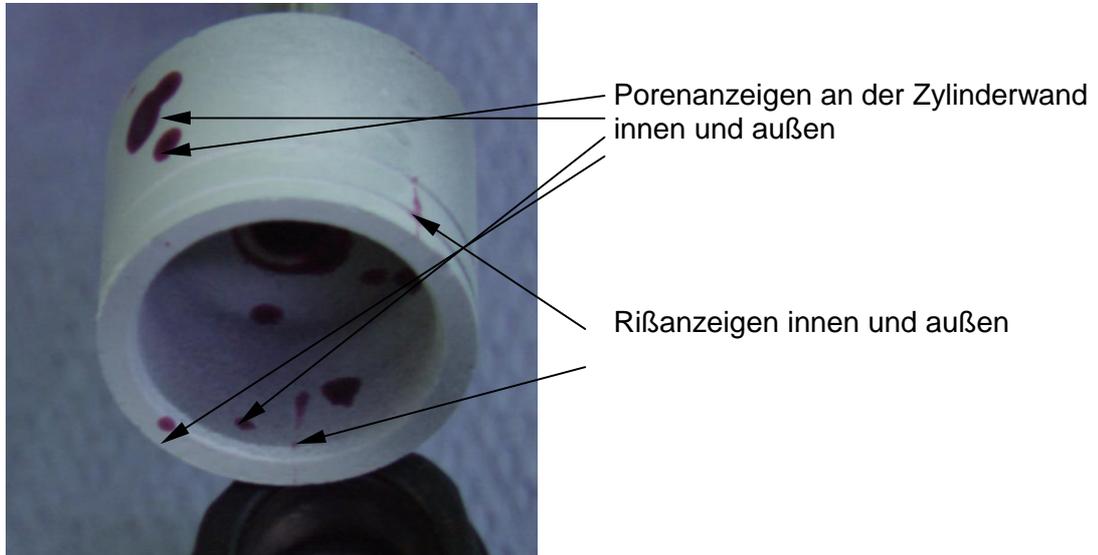


Bild 17: Rißuntersuchung am Kolben

9 Anhang 2 (PLU - Berichte)

- PLU Besprechungsbericht vom 16.10.1997
- PLU Bericht LE TEC-0004 vom 31.03.1998
- PLU Technical Report 98 MAN 002 vom 12.05.1998