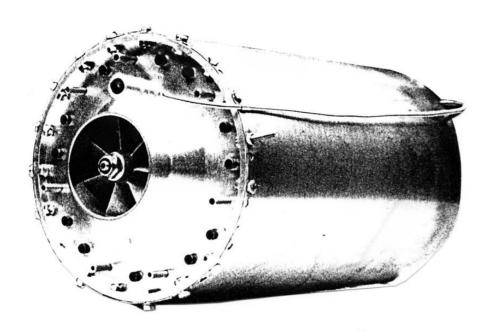
Test einer Gasturbine für Modellflugzeuge

nach dem Design von Funke und Wittig

- Aufbau 2 -



Zusammenfassung:

Für den zweiten Aufbau wurde das Einspritzsystem geändert. Dadurch war es möglich, Benzin als Kraftstoff zu verwenden, und erstmalig konnten Meßwerte bei Auslegungsdrehzahl aufgenommen werden. Die Laufzeit im 2. Aufbau betrug ca. 4 Stunden, davon 2 min bei Auslegungsdrehzahl.

Bei Auslegungsdrehzahl wurden folgende Werte gemessen:

spez. Verbrauch......180 kg/kNh

K. Wittig, den 7. Juli 1995

Änderungen des Bauzustands gegenüber dem 1. Aufbau

- a) Während der Triebwerkserprobung im 1. Aufbau stellte sich heraus, daß eine ausreichende Gemischaufbereitung mit Benzin als Kraftstoff nicht zu erzielen war. Mit leichter siedenden Kraftstoffen wie z.B. Etanol konnte jedoch ein einwandfreier Betrieb erreicht werden. Um doch noch die Vorteile eines Betriebs mit Benzin nutzen zu können, wurden neue Einspritzdüsen für den Verdampfer mit geänderter Einspritzrichtung eingebaut.
- b) Auf die weitere Verwendung der axialen Verdichterleitschaufeln wurde verzichtet, da sich dort bereits einige Verklebungen gelöst hatten.

Versuchsziele

- a) Es sollte untersucht werden, ob das Triebwerk jetzt mit Benzin betrieben werden kann.
- b) Wenn ein zufriedenstellendes Betriebsverhalten mit Benzin erreicht werden konnte, sollten die Standardkugellager gegen die Hochgenauigkeitslager getauscht und Messungen bis zur Auslegungsdrehzahl durchgeführt werden.

Instrumentierung

Wie schon für den 1. Aufbau beinhaltete die Instrumentierung nur Meßwertaufnehmer, die zur Ermittlung der Triebwerksleistungen und zur Betriebsüberwachung unbedingt nötig sind. <u>Bild1</u> zeigt deren Lage im Triebwerkslängsschnitt. Leider erwies sich die induktiv arbeitende Drehzahlmessung nach wie vor als unzuverlässig. Die Meßdüse vor dem Verdichter wurde nicht kalibriert. Zur Durchsatzberechnung wird ein CD-Wert von 0,98 geschätzt.

Zur Ermittlung der Temperaturverteilung in der Schubdüse wurde eine NiCrNi-Sonde mit der Hand durch den Abgasstrahl geführt. Diese Sonde ist als Mantel-thermoelement mit einem Durchmesser von 1mm ausgeführt.

Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden in einer Garage mit geöffnetem Tor durchgeführt. Wegen der starken Geräuschentwicklung wurde die Laufzeit auf höchstens 20 Minuten pro Tag begrenzt. Nachfolgend wird die Versuchsdurchführung geschildert. Zum Starten wird der Rotor mit Hilfe eines Gebläses auf eine Schleppdrehzahl von ca. 5000 U/min gebracht und die Glühkerze ca. 1min vorgeglüht. Danach wird ein kleiner Kraftstoffstrom in den Fackelzünder (siehe <u>Bild2</u>) geleitet. Der Kraftstoffstrom wird von Null weg stetig gesteigert, bis sich das Entflammen der Fakkel durch einen Temperaturanstieg im Abgas ankündigt. Jetzt wird die Hauptkraftstoffleitung geöffnet. Der Kraftstoffstrom wird gesteigert bis der Rotor ca.

22000 U/min erreicht hat und die Abgastemperatur im Düsenaustritt ca. 800°C beträgt. Bei dieser Drehzahl kann das Gebläse entfernt werden. Das Triebwerk ist nun betriebsbereit.

Nach dem Starten des Triebwerks wurde die gewünschte Drehzahl angefahren und die Meßwerte notiert. Anschließend wurde noch ein Blick durch die Schubdüse auf den Turbinenleitkranz geworfen und dann der nächste Betriebspunkt angefahren.

Anfangs wurde die Kraftstoffmenge mit einem Nadelventil gesteuert. Abhängig vom Brennkammerdruck hielt ein Druckregler den Kraftstoffdruck auf einem bestimmten Niveau.

Für die Versuche oberhalb von ca. 80000 U/min war der resultierende Kraftstoffdruck nicht mehr ausreichend. Deshalb ersetzte ein Dreiwegeventil die oben beschriebene Apparatur. Dieses Ventil schließt gleichzeitig die Rücklaufleitung, wenn die Leitung zum Triebwerk geöffnet wird. Das Ventil wurde mit einer Fernsteuerung verstellt, so daß eine Bedienung aus sicherer Entfernung möglich war.

Erprobung der Brennkammer

Mit den neuen Einspritzdüsen konnte von Anfang an Benzin als Kraftstoff verwendet werden. Mit der ursprünglichen Belochung (<u>Tabelle1</u>) traten folgende Probleme auf:

- Bei niedrigen Drehzahlen glühte ein Teil des Abgaskanals hellrot (<u>Bild2</u>), sonst war keinerlei Glühen zu beobachten. Mit steigender Drehzahl nahm das Glühen zuerst zu, um dann bei ca. 60000 U/min plötzlich zu verschwinden.
- Flammenzucken im Turbinenleitkranz. Das Gebiet erstreckte sich auf ca. 1/4 des Umfangs und wurde abhängig vom Betriebspunkt an unterschiedlichen Positionen beobachtet.
- Eine dröhnende Verbrennung, wahrscheinlich durch eine stark fluktuierende Flammenfront verursacht.
- Beim schnellen Gaswegnehmen neigte die Brennkammer zum Verlöschen.
- Nach dem Zerlegen des Triebwerks zeigte sich, daß die Flammrohrrückwand durch die behinderte radiale Ausdehnung wellig wurde.

Offensichtlich war die Primärzone zu mager. Deshalb wurden 4 Löcher der Primärzone mit Schrauben verschlossen und außerdem zwei Schlitze in die Flammrohrrückwand geschnitten, um ihr eine thermische Ausdehnung zu ermöglichen.

Mit dieser geänderten Belochung der Brennkammer war eine einwandfreie Beschleunigung und Verzögerung des Rotors möglich. Nur noch bei sehr schneller Beschleunigung war ein leichtes Flammenzüngeln im Turbinenleitkranz zu beobachten. Das dröhnende Geräusch trat nicht mehr auf. Die Abgastemperaturen lagen jetzt etwas niedriger. Der ringförmige glühende Abschnitt im Abgaskanal

Mit dieser Brennkammerkonfiguration wurden nun einige Temperatur-Traversierungen im Schubdüsenaustritt durchgeführt. Der Weg der Sonde durch den Abgasstrahl ist auf <u>Bild3</u> zu sehen. Zuerst wurde eine Messung mit Etanol als Kraftstoff durchgeführt (<u>Bild4</u>), dann eine mit Benzin (<u>Bild5</u>). Folgende Besonderheiten sind zu sehen:

- Die höchsten Temperaturen wurden in beiden Fällen oben (TOP Position =
 12 Uhr) gemessen.
- Mit Benzin ist ein ausgeprägtes Temperaturminimum bei 5 bis 7 Uhr zu sehen.
 Die Temperaturdifferenz zum Maximum beträgt ca. 50 K.
- Außerdem liegen die Temperaturen mit Benzin in diesem Betriebspunkt
 (70000 U/min) um ca 30 K höher als mit Etanolverbrennung.
- Qualitativ sind die Temperaturverteilungen einander sehr ähnlich.

Die höheren Abgastemperaturen bei Benzinverbrennung müssen die Folge von Nachverbrennungen im Abgaskanal sein, da ja in beiden Fällen der gleiche Betriebspunkt eingestellt wurde. Die Aufenthaltszeit in der Primärzone ist für Benzinbetrieb also noch zu kurz.

Die Tatsache, daß die höchsten Temperaturen oben und die niedrigsten unten gemessen wurden, scheint dafür zu sprechen, daß bedingt durch die Schwerkraft unten ein viel zu fettes und oben ein nahezu stöchiometrisches Gemisch vorliegt. Allerdings wurde in der wandnahen Strömung ein Drallwinkel von ca. 10 bis 20 Grad gemessen, eine schwerkraftbedingte Schwankung in der Gemischverteilung sollte sich daher verdreht darstellen. Um diesen Widerspruch aufzuklären, wurde das Triebwerk um seine Längsachse verdreht und danach die Temperaturverteilung im Abgas nochmals gemessen. Auf <u>Bild6</u> ist die neue Lage von TOP zu sehen. TOP liegt jetzt auf ca. 4 Uhr. Die Meßwerte von <u>Bild7</u> und <u>8</u> wurden nacheinander aufgenommen. Der auf den Bildern vermerkte Drehzahlabfall war die Folge einer nachlassenden Batteriespannung. Deshalb fällt das Temperaturniveau insgesamt von der ersten zur letzten Messung ab. Außerdem kann man folgendes sehen:

- Der ausgeprägte Temperaturunterschied zwischen 12 Uhr und 6 Uhr ist verschwunden.
- Mit der unverdrehten Maschine sind vor allem die Werte der Meßdurchgänge 1 und 5 vergleichbar.

Der qualitativ ähnliche Verlauf der Meßdurchgänge 1 und 5 des verdrehten und des unverdrehten Triebwerks spricht dafür, daß die Temperaturunterschiede während dieser Messungen den Schwerkrafteinfluß wiederspiegeln. Die Schwerkraft ist daher zumindest nicht allein für die 50 K Temperaturdifferenz in <u>Bild5</u> verantwortlich. Die Temperaturdifferenz wird wohl die Folge einer ungünstigen Überlagerung von mehreren Effekten sein.

Leistungsmessungen

Begleitend zur Brennkammererprobung und Feineinstellung der Belochung wurden Meßwerte mit der Ø53 mm Schubdüse aufgezeichnet. Nachdem die Brennkammer ausreichend stabile Betriebsverhältnisse zuließ, wurden statt der Standardlager Hochgenauigkeitslager für Drehzahlen bis 120000 U/min eingebaut und der Kraftstoff-Druckregler wurde gegen das Dreiwegeventil ausgetauscht. Ausserdem wurde die Ø 60 mm Düse statt der Ø 53 mm Düse verwendet. In dieser Konfiguration konnten Messungen bis zur Auslegungsdrehzahl von 108000 U/min durchgeführt werden. Bei so hohen Drehzahlen entwickelt das Triebwerk einen enormen Lärm. Bis ca. 80000 U/min dominierten hochfrequente Rotationsgeräusche, darüber wurden diese vom Rauschen des Schubstrahls deutlich übertroffen. Ein Lärmmeßgerät stand zwar nicht zur Verfügung, aber aus der Tatsache, daß nach einem Vollgaslauf ohne Gehörschutz stundenlanges Ohrfiepen auftrat, kann geschlossen werden, daß die Lärmentwicklung in 7 m Abstand wohl noch deutlich über 90 dB lag.

Das Dreiwegeventil hat sich nicht so gut bewährt, da die Druckänderung bezogen auf den Verstellweg bei hohen Drehzahlen so groß wurde, daß ein feinfühliges Beschleunigen oder Verzögern nicht mehr möglich war.

Die <u>Bilder9 bis 11</u> zeigen die wesentlichen Ergebnisse der Leistungsmessungen, diese werden nachfolgend diskutiert.

In <u>Bild9</u> sind auf die angegebenen Drehzahlen umgerechnete Meßwerte zu sehen. Zusätzlich sind die Kennlinien des KKK-Verdichters mit seinem serienmäßigen Spiralgehäuse eingezeichnet. Durch die Verwendung eines mit Keilschaufeln bestückten Diffusors konnten bei hohen Drehzahlen deutlich höhere Drücke bei gleichem Durchsatz erreicht werden. Der berechnete Einstellwinkel der Keilschaufeln paßt anscheinend sehr gut.

Die in <u>Bild10</u> eingezeichneten Meßwerte oberhalb von 100000 U/min passen nicht in einen gemeinsamen Kurvenverlauf. Mit Hilfe von <u>Bild11</u> und <u>12</u> konnte entschieden werden, welcher der beiden glaubwürdiger ist. Da sich die gemessenen Temperaturen bei beiden Drehzahlen gut in den Kurvenverlauf in <u>Bild11</u> einfügen, war die Drehzahlmessung wohl in Ordnung. <u>Bild12</u> zeigt den zu erwartenden linearen Zusammenhang zwischen Schubkraft und Verdichtersaughöhe. Der vorletzte Meßwert bei 192 N liegt deutlich unterhalb des linearen Verlaufs und ist damit sehr wahrscheinlich zu niedrig gemessen worden. <u>Bild13</u> zeigt den Einfluß des Düsendurchmessers auf das Verhältnis von Temperaturbelastung zu Schubkraft.

Der Vollständigkeit halber sind in <u>Bild14</u> die Meßwerte des zur Betriebsüberwachung verwendeten 2mm starken Thermoelementes den gemittelten Meßwerten von 5 Einzelmessungen mit dem 1 mm starken Thermoelement gegenübergestellt. Bei hohen Drehzahlen verschwinden die Unterschiede.

Messungen mit Diesel als Kraftstoff

Nach Abschluß der Leistungsmessungen wurden Versuche mit Diesel als Kraftstoff unternommen. Dabei konnten folgende Besonderheiten beobachtet werden:

- Das Zündverhalten war sehr gut, das feinfühlige Einjustieren des Kraftstoffstroms zur Zündfackel war nicht mehr nötig, der Dieselkraftstoff zündete in einem weiten Bereich sofort.
- Leider bildete sich im Verdampfer eine Flammenfront, die mit steigender Drehzahl zwar immer mehr zu dessen Ende gedrückt wurde, aber nie ganz verschwand. Die Lage dieser Flammenfront zeigte sich durch eine ringförmig glühende Stelle im Abgaskanal, ganz ähnlich zu der früher geschilderten und in <u>Bild2</u> eingezeichneten Stelle bei Benzinbetrieb, nur daß diese bei Benzinbetrieb immer direkt hinter dem Verdampfer lag und bei höheren Drehzahlen erlosch.
- Nach dem Abstellen bildete sich eine dichte Rauchwolke.

Trotz der großen Vorteile wie der hohen Zündwilligkeit und des niedrigen Preises ist ein Umstellen auf Diesel ohne größere konstruktive Änderungen also nicht ratsam. Bei Versuchen mit Benzin-Diesel Mischkraftstoffen blieben die oben genannten Nachteile bestehen.

Weitere Messungen

Der Öldurchsatz beträgt ca. 24 L/h und der gesamte Strombedarf bei 12 V für die Kraftstoffpumpe und die Ölpumpe liegt bei 7 bis 10 Ampere, je nach Drehzahl und Öltemperatur. Die Ölkühlung mittels Kraftstoff ist bis ca. 80000 U/min ausreichend. Selbst nach ca 10 Minuten Laufzeit wurden 80°C nicht überschritten. Über dieser Drehzahl steigt die Öltemperatur schnell an, deshalb ist eine bessere Isolierung der Ölwanne gegen die heiße Verdichterluft erforderlich; nach Rechnung muß sogar ein zusätzlicher Öl/Luft-Kühler eingebaut werden.

Abschließend wurden die Sekundärbohrungen im Flammrohr noch von 8,5 mm auf 9 mm aufgebohrt, um den Druckabfall in der Brennkammer zu verkleinern und um das Gemisch in der Primärzone weiter anzureichern, da es mitunter beim schnellen Verzögern bei hohen Drehzahlen zum Verlöschen der Brennkammer gekommen war.

Ob sich das Verzögerungsverhalten dadurch gebessert hat, konnte nicht mehr festgestellt werden, denn bei den anschließenden Versuchen gelangte ein Stück geschmolzenes Messing, das vom stillgelegten ursprünglichen Einspritzsystem stammen mußte, in die Turbine. Zwar konnten keine Beschädigungen an der Turbine festgestellt werden, aber solange sich noch Reste des alten Einspritzsystems im Verdampfer befinden, wird auf weitere Versuche verzichtet.

Zustand des Triebwerks nach Abschluß der Versuche

Nach der Demontage zeigten sich keine besonderen Beschädigungen. Der Grad der Verzunderung des Flammrohres aus X10 hat weiter zugenommen, aber es traten keine Anschmelzungen auf. Die Blechkegel des Verdampfers sind in einem sehr guten Zustand, es sind keinerlei Risse oder Verzunderungen zu sehen. Trotzdem muß der Verdampfer vor weiteren Versuchen zerschnitten werden, um die stillgelegte ursprüngliche Einspritzringleitung zu entfernen.

Die Laufbahnen der Rotorlager sind frei von Ausbrüchen und die Käfige zeigen ebenfalls keine Anzeichen von Verschleiß.

Auf den <u>Bildern15 bis 22</u> ist das Triebwerk zuerst auf dem Prüfstand zu sehen und dann während der Zerlegung. <u>Bild23</u> zeigt das gesamte Teilespektrum ohne Prüfstand und Anbaugeräte.

Bei den Anbaugeräten ist die Kraftstoffpumpe am meisten abgenutzt. Der Kraftstoffdruck fluktuiert bei 4 bar Überdruck um mehrere 100 mbar.

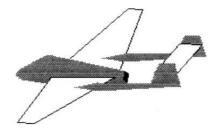
Das Dreiwegeventil ist undicht und hakelig beim Verstellen und muß ausgetauscht werden.

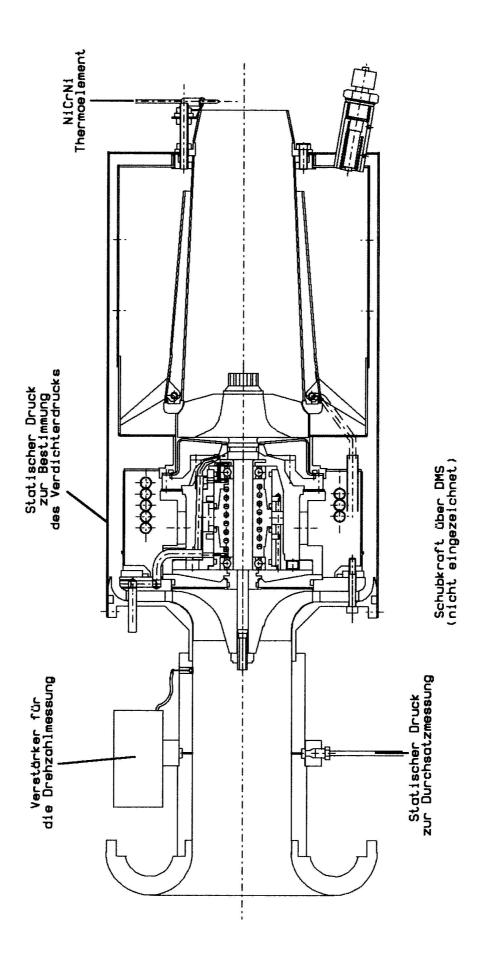
Zusammenfassung

Die projektierten Leistungen wurden erreicht. Mechanische Probleme sind noch nicht zu Tage getreten. Die Lärmentwicklung ist zu hoch.

Probleme gibt es mit der Ölkühlung, das Öl wird bei Drehzahlen oberhalb von 80000 U/min zu heiß. Die Ölwanne war bisher nicht gegen die heiße Verdichterluft isoliert. Ein zusätzlicher Öl/Luft-Kühler ist nötig.

Vor weiteren Versuchen muß der Verdampfer aufgeschnitten werden, um den alten Kraftstoffverteiler zu entfernen.





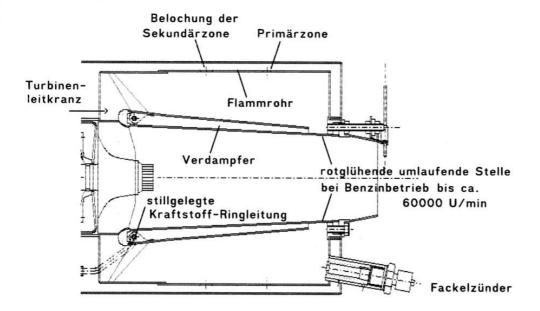
(**Rbb. 1)** Instrumentierungsübersicht

FW05-Übersicht

Tabelle1: Belochungen

Belochung Variation Nr:	Belochung Primärzone	Belochung Sekundärzone	Bemerkungen
1	20*Ø5,5	20*Ø8,5	-dröhnende Verbrennung -Flämmchen im Turbinenleitkranz
2	16*Ø 5,5	20* Ø 8,5	-keine Besonderheiten
3	16* Ø 5,5	20* Ø 9	-Vollgastest steht noch aus

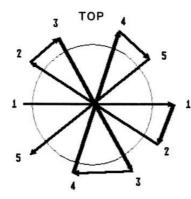
Bild2: Die Brennkammer



Bearb.	21.6.95 Wittig	Abb.
Gepr.		BI.

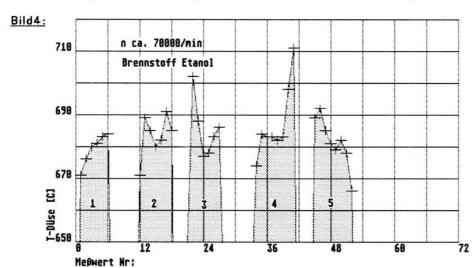
Die Meßsonde wurde nach folgendem Schema durch den Abgasstrahl geführt:

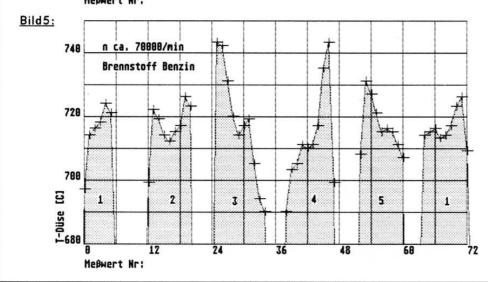
Bild3:



Ansicht gegen die Strömungsrichtung

Austrittstemperaturverteilung bei Etanol und Benzinverbrennung:





Bearb.	20.6.95	Wittig	
Gepr.			1

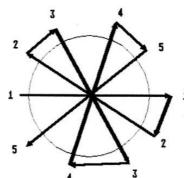
FW05 - Meßwerte Traversierung hinter der Schubdüse

Seite 11

Die Meßsonde wurde nach folgendem Schema durch den Abgasstrahl geführt:

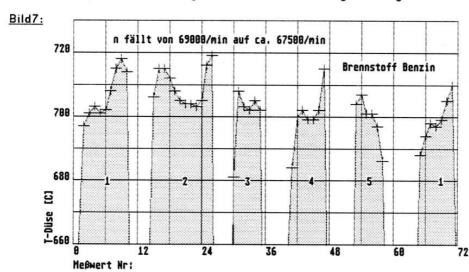
Bild6:

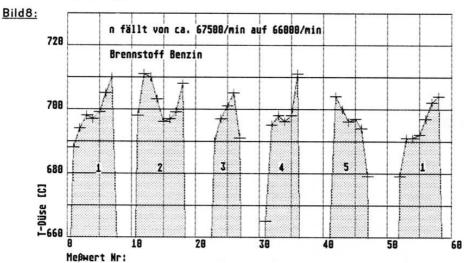
Ansicht gegen die Strömungsrichtung



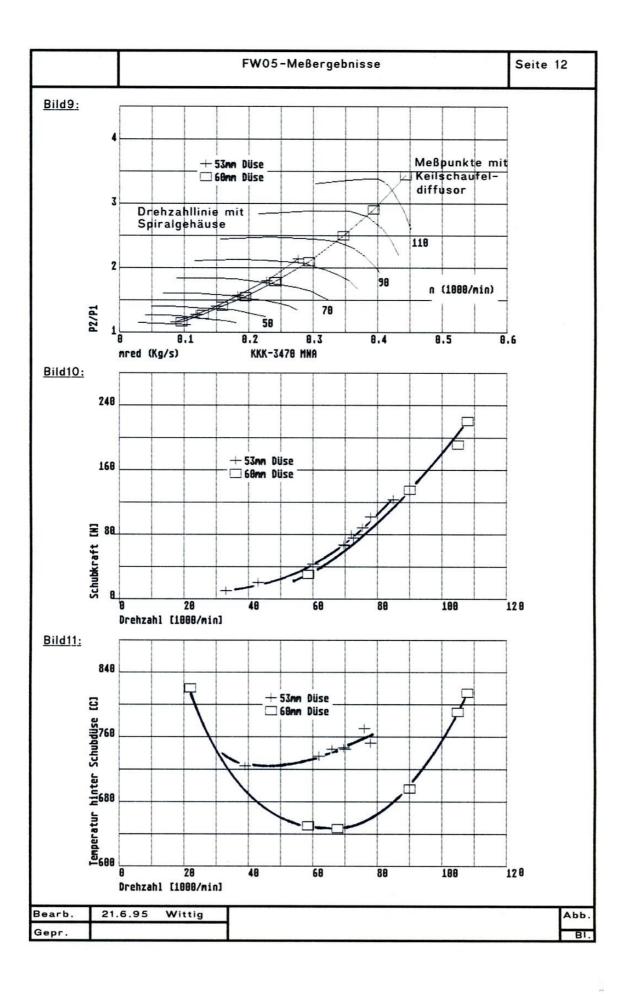
TOP liegt jetzt hier!

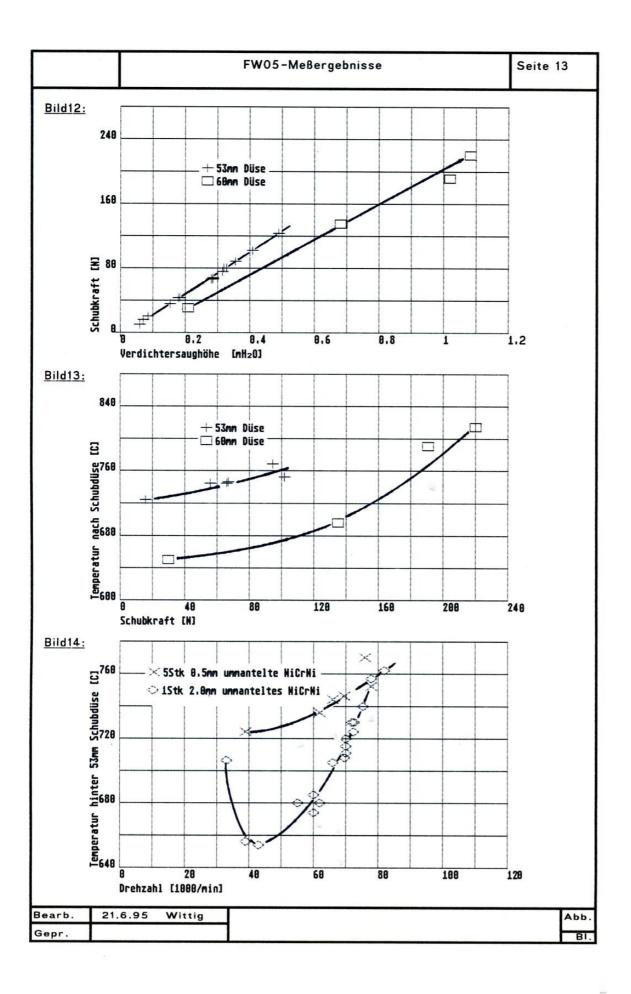
Austrittstemperaturverteilung bei um 1140 um die Längsachse gedrehtem Triebwerk:





20.6.95	Wittig	Abb
		RI
	20.6.95	20.6.95 Wittig



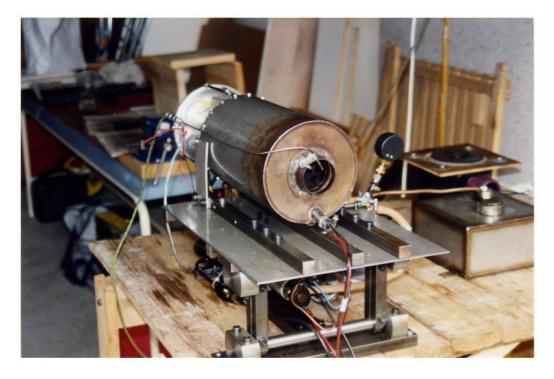


FW05-Fotos

Bild15: Prüfstand von vorn-oben, Ansicht mit Meßgeräten



Bild16: Prüfstand von schräg-hinten, Triebwerk mit montierter Ø 53mm Düse



FW05-Fotos

Bild17: Prüfstand von der Seite, unter dem Triebwerk sind die Pumpen zu erkennen

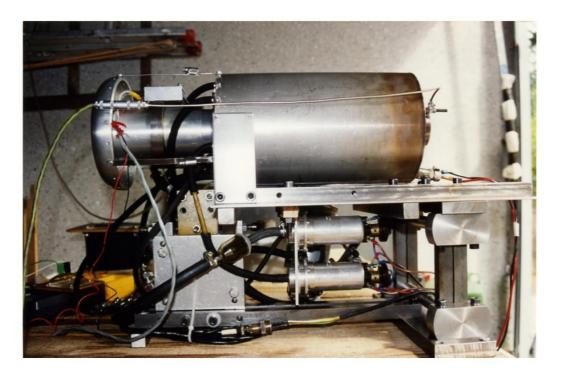


Bild18: Triebwerk ohne Außenmantel, Blick von hinten auf das Flammrohr



Bild19: Triebwerk ohne Außenmantel und ohne Flammrohr, Blick auf den Verdampfer



Bild20: Blick auf die Turbinenleitschaufeln, Ansicht von hinten-links



Bild21: Blick in das Innere des Flammrohres



Bild22: Blick auf die gegenüberliegende Seite



FW05-Fotos

Bild23: Teilespektrum



Bearb.	21.6.95 Wittig	Abb
Gepr.		
		B